



**Escuela de Caminos**  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
UPC BARCELONATECH

# **Análisis geotécnico de un deslizamiento superficial en Cercs (Prépirineo Catalán)**

Trabajo realizado por:

**Ángel Mamani Mayta**

Dirigido por:

**Marcel Hürlimann Ziegler**

**José Moya Sánchez**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno**

Barcelona, junio del 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## Resumen

El presente trabajo consiste en realizar un análisis geotécnico de un deslizamiento superficial, que se sitúa en el poblado de Sant Jordi de Cercs, perteneciente a la comarca de Berguedà, Cataluña. Es accesible mediante vía terrestre desde la ciudad de Barcelona.

El deslizamiento se encuentra ubicado en el margen izquierdo del río Peguera que drena hacia la presa de Baells, la inclinación de la ladera se encuentra entre 10 a 15° respecto a la horizontal. Geométricamente el deslizamiento tiene 15m de ancho y 32.2m de longitud máxima en dirección al deslizamiento con azimut 135°, la superficie de deslizamiento se ubica a 0.60-0.80m de profundidad. No obstante, en la cabecera del deslizamiento existe un escarpe de 0.2 a 0.25m.

Los materiales que conforman el deslizamiento existente son tres: coluvial en la parte superficial, compuesta por arcilla inorgánica de baja plasticidad; seguido por una capa delgada de argilita alterada compuesta por arcilla inorgánica de media a baja plasticidad, posteriormente seguido por argilita inalterada clasificada como arcilla inorgánica de alta plasticidad. La conductividad hidráulica para coluvial resulta de  $2.9 \times 10^{-8}$  m/s, para argilita alterada  $5.6 \times 10^{-9}$  m/s y para argilita inalterada  $4.7 \times 10^{-10}$  m/s, siendo esta última capa impermeable. Por otro lado, los parámetros resistentes se han puesto más énfasis en la capa de argilita alterada, donde se encuentra la superficie de rotura, en la cual se ha estimado a partir de ensayos de corte directo y corte anular: cohesión nula y ángulo de fricción 15° en condiciones residuales.

También, la zona de estudio cuenta con dos estaciones de monitoreo METEO y SLOPE. En la estación METEO se registra temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa y precipitación; mientras en la estación SLOPE se registra la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua, potencial hídrico, presión de poros y desplazamientos. En este trabajo se analiza la evolución de los registros desde enero del 2015 hasta abril del 2019.

Al tener definido la superficie de rotura, caracterización del material y los datos de monitoreo; se ha realizado el análisis de estabilidad utilizando el software Slide 8.0 de Rocscience basado en el método de equilibrio límite, para evaluar el factor de seguridad FS. El análisis se realiza para varias condiciones tomando en cuenta las fluctuaciones de nivel freático obtenido a partir de la piezometría. Con el nivel freático máximo registrado de monitoreo el FS resulta 1.14; lo cual se corrobora con las medidas de extensómetro que no registro desplazamientos; en consecuencia, se concluye que la ladera se encuentra estable.

Finalmente, se ha implementado un modelo numérico de elementos finitos en Code\_Bright para ver el efecto de la interacción de suelo-atmósfera, mediante acoplamiento termo-hidráulico. Los parámetros del modelo consisten en datos atmosféricos, parámetros hidráulicos del suelo y las condiciones de flujo y atmosférico. La simulación se ha realizado para 4 años (2015-2018), y los resultados de la modelación tales como, la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua y presión de líquido expresado en succión, se han contrastado con los registros obtenidos a partir de sensores geotécnicos. Los resultados comparativos muestran buena concordancia entre el modelo y las mediciones in-situ.

## Abstract

The study a geotechnical analysis of a shallow landslide, which is situated near the village of Sant Jordi de Cercs, belonging to the Berguedà region, Catalonia. It is accessible by land from the city of Barcelona.

The landslide is in the left margin of the Peguera river that drains towards the Baells water reservoir, the inclination of the slope is between 10 to 15°. The slide is 15m wide and 32.2m at the maximum length in the direction of the slide with azimuth 135°, the sliding surface is located at depth of 0.60-0.80m. However, at the head of the landslide there is a scarp of 0.2 to 0.25m.

The materials incorporated by the slide are three: colluvial in the most superficial part, composed of inorganic clay of low plasticity; followed by a thin layer of altered argillite composed of inorganic clay of medium to low plasticity, later followed by unaltered argillite classified as inorganic clay of high plasticity. The hydraulic conductivity for the colluvial layer is  $2.9 \times 10^{-8}$  m/s, for the altered argillite  $5.6 \times 10^{-9}$  m/s and for the unaltered argillite  $4.7 \times 10^{-10}$  m/s, the latter layer being impermeable. On the other hand, strength parameters have more emphasis on the altered argillite layer, where the failure surface is found, in which it has been estimated by direct shear and annular shear tests: a cohesionless material with friction angle of 15° in residual conditions.

Also, the study area has two monitoring stations: METEO and SLOPE. METEO station records air temperature, atmospheric pressure, relative humidity and precipitation; while the SLOPE station records soil temperature, volumetric water content, water potential, pore pressure and displacements. This paper analyzes the evolution of the records measured from January 2015 to April 2019.

Through the determination of the failure surface, characterization of the material and study of the monitoring data, a stability analysis was performed, using the Rocscience Slide 8.0 software based on the limit equilibrium method to evaluate the FS safety factor. The analysis is carried out for several conditions considering the fluctuations of the water table obtained from the piezometry. With the maximum phreatic level of the analysis, the FS is 1.14; which is corroborated by the extensometer measures that do not register displacements; consequently, it is concluded that the slope is stable.

Finally, a numerical model of finite elements has been implemented in Code\_Bright to see the effect of the interaction soil-atmosphere, by means of thermo-hydraulic coupling. The parameters of the model consist of atmospheric, hydraulic and atmospheric conditions. The simulation was carried out for 4 years (2015-2018), and the results of the modeling, such as soil temperature, volumetric content of water and liquid pressure expressed in suction, have been contrasted with the records obtained from geotechnical sensors. The comparative results show a good correlation between the model and in-situ measurements.

## **Agradecimientos**

A mis tutores Marcel Hürlimann y José Moya por la orientación, seguimiento, conocimiento y motivación para culminar este trabajo. También, a los profesores del grupo de investigación en especial a Antonio Lloret, Jean Vaunat y Carol Puig, por tener paciencia y amabilidad de compartir sus conocimientos.

A Raül Oorthuis por haber compartido sus conocimientos en la parte de instrumentación, a Claudia Villarraga quien me brindó el soporte para la modelación en Code\_Bright y a Roger Ruiz por su ayuda en la parte de fotogrametría.

A laboratorio de mecánica de suelos “GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP”, en especial a Joan Martínez por facilitarme el laboratorio para llevar acabo los ensayos necesarios para este trabajo.

A toda mi familia, en especial a mis padres Víctor y Feliciano, por ser ejemplo de vida y su apoyo incondicional que siempre me brindan para seguir con mis metas.

A todos mis amigos y compañeros de estudio, en especial a Stephania Rodríguez y Oscar Casanova, siempre con ellos puedo contar en cualquier momento.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo PRONABEC, Perú, por haberme dado la oportunidad para realizar el Máster.

Por último, a todo el grupo de profesores de Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, por su enseñanza.



## Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Metodología general de trabajo .....	3
1.4	Estructura del documento .....	3
<b>2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ubicación .....	5
2.2	Trabajos de campo .....	5
2.3	Fotogrametría digital del terreno .....	6
2.4	Descripción de geología regional y cartografía geológica a detalle .....	7
2.4.1	Geología regional .....	7
2.4.2	Geología local .....	8
2.4.2.1	<i>Geomorfología</i> .....	8
2.4.2.2	<i>Litología</i> .....	10
2.5	Sondeos manuales .....	11
2.5.1	Sondeo PZ-2 .....	12
2.5.2	Sondeo PZ-3 .....	12
2.6	Instalación de sensores geotécnicos in-situ .....	13
2.6.1	Instalación de piezómetro de cuerda vibrante .....	13
2.6.2	Instalación de extensómetro horizontal .....	14
2.6.3	Instalación del convertidor SDI-12 para el sensor MPS-2 .....	14
<b>3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MATERIAL .....</b>	<b>15</b>
3.1	Ensayos de identificación .....	15
3.1.1	Análisis granulométrico .....	15
3.1.2	Límite de Atterberg .....	17
3.1.3	Clasificación de suelos finos a partir de Límites de Atterberg .....	18
3.2	Ensayos para estimar la conductividad hidráulica .....	19
3.2.1	Ensayo de infiltración .....	19
3.2.2	Ensayo de permeabilidad por carga variable .....	20
3.2.3	Conductividad hidráulica a partir del edómetro (corte-directo) .....	22
3.2.4	Estimación de permeabilidad intrínseca .....	24
3.2.5	Permeabilidad relativa .....	25
3.3	Ensayo de corte directo .....	26
3.3.1	Descripción del equipo .....	26
3.3.2	Preparación de la muestra .....	27
3.3.3	Procedimiento de ensayo .....	28

3.3.4	Resultados de la etapa de consolidación del ensayo de corte directo.....	28
3.3.5	Resultado de parámetros físicos y resistentes del ensayo de corte directo.....	31
3.3.6	Análisis de resultados del ensayo de corte directo .....	36
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE AUSCULTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS REGISTRADOS .....</b>	<b>39</b>
4.1	Sistema de auscultación en el deslizamiento existente en Cercs.....	39
4.1.1	Estación METEO .....	39
4.1.2	Estación SLOPE.....	41
4.1.3	Estación meteorológica de Guardiola de Berguedà.....	44
4.2	Verificación y calibración de sensores geotécnicos en laboratorio .....	44
4.2.1	Verificación de piezómetro de cuerda vibrante .....	45
4.2.2	Calibración del extensómetro horizontal sensor (ASM WS12-300).....	48
4.2.3	Instalación del conversor SDI-12 para el sensor MPS-2.....	50
4.3	Análisis de datos registrados por el sistema de auscultación .....	53
4.3.1	Precipitación.....	53
4.3.2	Piezometría.....	54
4.3.3	Contenido volumétrico de agua en el terreno.....	55
4.3.4	Potencial hídrico (succión).....	56
4.3.5	Curva de retención .....	57
4.3.6	Temperatura del aire y en el terreno.....	60
4.3.7	Medidas de extensómetro.....	61
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE.....</b>	<b>63</b>
5.1	Introducción .....	63
5.1.1	Principios de equilibrio límite .....	63
5.1.2	Método de equilibrio límite .....	65
5.2	Análisis de estabilidad del deslizamiento existente en Cercs.....	69
5.2.1	Descripción del deslizamiento existente en Cercs.....	69
5.2.2	Definición de la geometría para el análisis .....	70
5.2.3	Propiedades de los materiales .....	70
5.2.4	Análisis de estabilidad en condición actual.....	71
5.2.5	Análisis de estabilidad de acuerdo a la variación de nivel freático .....	71
5.2.6	Análisis de sensibilidad paramétrica de ángulo de fricción .....	73
5.2.7	Análisis retrospectivo .....	74
<b>6</b>	<b>MODELACIÓN TERMO-HIDRÁULICO EN CODE_BRIGHT.....</b>	<b>75</b>
6.1	Introducción .....	75
6.2	Formulación básica .....	75
6.2.1	Ecuaciones que gobiernan.....	76
6.2.1.1	<i>Ecuaciones de balance</i> .....	76

6.2.1.2	<i>Ecuaciones constitutivas</i> .....	78
6.2.2	Restricciones de equilibrio .....	79
6.2.3	Condición de contorno del flujo .....	80
6.3	Condiciones atmosféricas .....	80
6.3.1	Flujo de masa .....	80
6.3.2	Flujo de energía .....	82
6.4	Implementación del modelo Termo-Hidráulico en la ladera natural en Cercs .....	85
6.4.1	Definición de la geometría del modelo .....	85
6.4.2	Definición de datos del problema .....	86
6.4.3	Parámetros del material .....	87
6.4.4	Definición de condiciones de contorno en el modelo .....	88
6.4.5	Intervalo de datos .....	93
6.4.6	Malla de elementos finitos .....	94
6.4.7	Resultados y análisis de la modelación .....	95
6.4.7.1	<i>Temperatura</i> .....	95
6.4.7.2	<i>Contenido volumétrico de agua</i> .....	96
6.4.7.3	<i>Presión de líquido</i> .....	99
6.4.7.4	<i>Cálculo de factor de seguridad</i> .....	101
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS</b> .....	<b>104</b>
7.1	Conclusiones .....	104
7.2	Líneas de trabajo futuras .....	105
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>106</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>109</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Ubicación de la zona de estudio (ICGC, 2018). .....	5
<b>Figura 2:</b> Trabajos de campo; b y c) Instalación de extensómetro y piezómetro, (d) Almacenamiento de datos (data logger), (e) Ejecución de sondeo manual y (f) Obtención de la muestra. ....	6
<b>Figura 3:</b> Plan de vuelo (lado izquierdo) y vista isométrica 3D altura de vuelo (lado derecho).....	6
<b>Figura 4:</b> Geología regional de la zona de estudio. Fuente: ICGC.....	7
<b>Figura 5:</b> Mapa geomorfológico zona de deslizamiento existente en Cercs.....	9
<b>Figura 6:</b> Mapa de pendientes zona de deslizamiento existente en Cercs. ....	9
<b>Figura 7:</b> Mapa geológico local de la zona de deslizamiento en Cercs. ....	10
<b>Figura 8:</b> Modelo geológico de la zona de deslizamiento en Cercs y detalle de los sondeos.....	11
<b>Figura 9:</b> Identificación de la superficie de rotura en argilita alterada. PZ-2 prof. 80 cm.....	13
<b>Figura 10:</b> Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante en sondeos PZ-2 y PZ-3. ....	14
<b>Figura 11:</b> (a) Instalación de extensómetro en Cercs. (b) Diagrama de instalación del extensómetro. ....	14
<b>Figura 12:</b> Curva de distribución de tamaño de las partículas.....	16
<b>Figura 13:</b> Clasificación de suelos finos de acuerdo a la Carta de Casagrande.....	19
<b>Figura 14:</b> Permeámetro y sus accesorios. (1) Bureta, (2) anillo metálico, (3) base del permeámetro, (4) válvula de conexión bureta y la probeta, (5) anillo metálico para la probeta, (6) piedras porosas, (7) anillo para fijar la probeta en la base del permeámetro y (8) válvulas de fijación. ....	21
<b>Figura 15:</b> Conductividad hidráulica respecto a la profundidad.....	24
<b>Figura 16:</b> Equipo de corte directo. (a) Ordenador para registrar datos. (b) Pistón de carga. (c) y (d) Medidor de desplazamiento vertical y horizontal. (e) Yugo de aplicación de cargas.....	26
<b>Figura 17:</b> Accesorios de equipo de corte. (a) Caja de corte. (b) Piedras porosas. (c) Extractor de muestra. (d) Muestreador. (e) Placa de transferencia de carga. (f) Placa ranurada.....	27
<b>Figura 18:</b> (a) Muestra obtenida en campo. (b) Muestra en el anillo de corte. (c) Muestra después del ensayo de corte directo. ....	27
<b>Figura 19:</b> (a) Armado de la caja de corte. (b) Adquisición mediante un ordenador.....	28
<b>Figura 20:</b> Etapa de consolidación para coluvial sometido a una carga vertical de 20 kN/m <sup>2</sup> . ....	29
<b>Figura 21:</b> Etapa de consolidación para argilita alterada sometida a una carga vertical de 40 kN/m <sup>2</sup> . ....	29
<b>Figura 22:</b> Etapa de consolidación para argilita inalterada sometida a una carga vertical de 40 kN/m <sup>2</sup> . ...	30
<b>Figura 23:</b> (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de coluvial. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$ y $\phi'$ ) del ensayo corte directo. ....	33
<b>Figura 24:</b> (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de argilita alterada. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$ y $\phi'$ ) del ensayo corte directo. ....	34
<b>Figura 25:</b> (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de argilita inalterada. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$ y $\phi'$ ) del ensayo corte directo. ....	35
<b>Figura 26:</b> Resumen corte directo y corte anular para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. ....	37
<b>Figura 27:</b> Ángulo de fricción residual en función de IP (Lupini et al., 1981).....	37
<b>Figura 28:</b> Gráfico idealizado para ver la variación entre el ángulo de fricción residual y el índice de plasticidad. Basado en Skempton (1985) y Lupini et al (1981).....	38
<b>Figura 29:</b> (a) Estación meteorológica METEO. (b) Estación METEO y SLOPE en Cercs. ....	40

<b>Figura 30:</b> Estación SLOPE, cuenta con varios sensores auscultados en el deslizamiento existente.....	42
<b>Figura 31:</b> Proceso de verificación del piezómetro. (a) Probeta para añadir distintas cargas hidráulicas. (b) Piezómetros sumergidos en agua sin filtro. (c) Proceso de toma de datos para la lectura cero. ....	46
<b>Figura 32:</b> Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334250.....	47
<b>Figura 33:</b> Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334251.....	48
<b>Figura 34:</b> Proceso de calibración del sensor (extensómetro horizontal). (a) Instalación sobre superficie plana. (b) Extensómetro horizontal con salida lineal de señal eléctrica de un cable no elástico. ....	49
<b>Figura 35:</b> Factor de calibración del extensómetro horizontal. ....	49
<b>Figura 36:</b> Esquema de conexión: Convertidor SDI-12, MPS-2, data logger, ordenador y el móvil. ....	50
<b>Figura 37:</b> Configuración de 4015 en Software SDI12Interface.exe de High Sierra Electronics. ....	51
<b>Figura 38:</b> Proceso de humedecimiento del suelo. a) Suelo seco, b) Suelo húmedo y c) Suelo mojado...	52
<b>Figura 39:</b> Relación entre succión kPa y Voltios, para una arcilla de baja plasticidad.....	53
<b>Figura 40:</b> Regresión lineal para completar los registros de precipitación en la estación Meteo. ....	53
<b>Figura 41:</b> Precipitaciones pluviales en la estación METEO registrado desde 2015 al 2019.....	54
<b>Figura 42:</b> Registro de presión de agua en el terreno desde enero del 2015 hasta abril del 2019. ....	55
<b>Figura 43:</b> Registro de contenido volumétrico de agua (VWC) 2015 al 2019. ....	55
<b>Figura 44:</b> Registro de potencial hídrico desde enero del 2015 hasta finales de abril del 2019. ....	56
<b>Figura 45:</b> Registro de potencial hídrico de 2015. ....	57
<b>Figura 46:</b> (a) Comportamiento de succión respecto al contenido volumétrico de agua. (b) Precipitaciones pluviales. ....	58
<b>Figura 47:</b> (a) Curva de retención para coluvial y (b) Curva de retención para argilita alterada. ....	59
<b>Figura 48:</b> Curva de retención para argilita inalterada, asumida del trabajo de Trabelsi (2018). ....	60
<b>Figura 49:</b> Registro de temperatura del suelo y temperatura del aire en color amarillo. ....	61
<b>Figura 50:</b> Desplazamiento registrado con extensómetro y comparado con la precipitación.....	61
<b>Figura 51:</b> Desplazamiento registrado con extensómetro y comparado con registro de otros instrumentos. (a) Relación entre desplazamiento-precipitación diaria. (b) Presión de agua medida con piezómetro. (c) Contenido volumétrico de agua medida con sensor 10HS y (d) Temperatura del aire. ....	62
<b>Figura 52:</b> Definición de varios factores de seguridad (Abramson et al., 2002). ....	64
<b>Figura 53:</b> División en rebanadas a fin de aplicar el método de equilibrio límite (Alonso, 2005). ....	64
<b>Figura 54:</b> Diagrama de fuerzas para una rebanada usando el método de Janbú generalizado. ....	66
<b>Figura 55:</b> Diagrama de fuerzas para una rebanada usando el método de Bishop simplificado.....	67
<b>Figura 56:</b> Deslizamiento existente en Cercs. (a) Vista en planta y (b) Perfil longitudinal. ....	69
<b>Figura 57:</b> Definición del modelo geológico en Slide 8.0 para el análisis de estabilidad. ....	70
<b>Figura 58:</b> Factor de seguridad en condición actual en el deslizamiento existente de Cercs. ....	71
<b>Figura 59:</b> (a) Registro de presión de líquido en piezómetros. (b) Definición de nivel freático (NF) mínimo y máximo, incrementos de NF por encima de nivel freático máximo y saturación del terreno. ...	72
<b>Figura 60:</b> Factor de seguridad respecto a la variación de nivel freático. ....	73
<b>Figura 61:</b> FS obtenido a partir de la variación del NF y el ángulo de fricción residual. ....	74
<b>Figura 62:</b> Representación esquemática de material poroso no saturado en manual de Code_Bright. ....	75
<b>Figura 63:</b> Definición del modelo en Code_Bright. (a) Unidimensional 1D y (b) bidimensional 2D.....	86

<b>Figura 64:</b> Definición de datos del problema para el modelo 1D y 2D.....	86
<b>Figura 65:</b> Asignación de material. (a) Modelo 1D y (b) Modelo 2D.....	88
<b>Figura 66:</b> El modelo 2D dividido en 11 bloques para definir la presión de líquido en cada bloque.....	89
<b>Figura 67:</b> Condición de contorno del flujo en la base y en la parte superior condición atmosférica. ....	91
<b>Figura 68:</b> Datos atmosféricos durante el período 2014 al 2018 representado por día. (a) Temperatura del aire promedio. (b) Presión atmosférica. (c) Humedad relativa. (d) Radiación solar media. (e) Precipitación pluvial y (f) Velocidad del viento.....	92
<b>Figura 69:</b> (a) Archivo creado para el modelo 1D con 14 columnas. (b) Archivo creado para el modelo 2D con 18 columnas. En ambas contienen 1872 filas. ....	93
<b>Figura 70:</b> Definición de intervalo de datos. (a) Intervalo 1 y (b) Intervalo 2.....	93
<b>Figura 71:</b> Generación de la malla de elementos finitos. (a) Modelo 1D. (b) Modelo 2D. ....	94
<b>Figura 72:</b> Comparación de temperatura del suelo simulada (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 en la ladera de Cercs. (a) Temperatura a 23cm de profundidad y (b) a 36cm de profundidad. ....	96
<b>Figura 73:</b> Comparación de VWC simulado (1D y 2D) vs medido a 11cm de profundidad con el sensor 10HS en la ladera de Cercs en 2017 y 2018. ....	97
<b>Figura 74:</b> Comparación de VWC entre simulado (1D y 2D) vs dato medido con el sensor 10HS a 23cm de profundidad. (a) VWC 2015 y 2016. (b) VWC 2017 y 2018. ....	98
<b>Figura 75:</b> Comparación de VWC entre simulado (1D y 2D) vs dato medido con el sensor 10HS a 36cm de profundidad. (a) VWC 2015 y 2016. (b) VWC 2017 y 2018. ....	99
<b>Figura 76:</b> Comparación de succión entre el modelo (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 a 23cm de profundidad. (a) Succión 2015 y 2016. (b) Succión 2017 y 2018. ....	100
<b>Figura 77:</b> Comparación de succión entre el modelo (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 a 36cm de profundidad. (a) Succión 2015 y 2016. (b) Succión 2017 y 2018. ....	101
<b>Figura 78:</b> Esquema del talud infinito para el cálculo de factor de seguridad en la ladera de Cercs.....	102
<b>Figura 79:</b> Evolución de factor de seguridad por día desde 2015 al 2018.....	103

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Ubicación de los sondeos manuales. ....	12
<b>Tabla 2:</b> Promedio de tres lecturas iniciales transformadas en unidades ingenieriles. ....	13
<b>Tabla 3:</b> Resumen de muestreo para el ensayo de laboratorio. ....	15
<b>Tabla 4:</b> Análisis granulométrico de la zona de deslizamiento en Cercs. ....	16
<b>Tabla 5:</b> Detalles y resultado del ensayo límite líquido. ....	17
<b>Tabla 6:</b> Detalles y resultado del ensayo límite plástico. ....	17
<b>Tabla 7:</b> Resumen de límites de Atterberg, índice de plasticidad, consistencia y fluidez. ....	18
<b>Tabla 8:</b> Resumen de ensayos de granulometría y Límites de Atterberg. ....	19
<b>Tabla 9:</b> Resumen de todos los ensayos de infiltración hasta el momento de Cercs. ....	20
<b>Tabla 10:</b> Detalle y resultado del ensayo de permeabilidad por carga variable. ....	22
<b>Tabla 11:</b> Estimación de conductividad hidráulica a partir de la consolidación (Corte-Directo). ....	23
<b>Tabla 12:</b> Conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca de las capas. ....	24
<b>Tabla 13:</b> Desplazamiento de la caja en función del tipo de suelo. ....	31
<b>Tabla 14:</b> Estimación de la velocidad máxima de corte. ....	31
<b>Tabla 15:</b> Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para coluvial. ....	33
<b>Tabla 16:</b> Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para argilita alterada. ....	34
<b>Tabla 17:</b> Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para argilita inalterada. ....	35
<b>Tabla 18:</b> Resumen del sistema de instrumentación de Cercs. ....	39
<b>Tabla 19:</b> Características y especificaciones técnicas del pluviómetro (Decagon ECRN-100). ....	40
<b>Tabla 20:</b> Características y especificaciones técnicas del sensor de humedad relativa y temperatura. ....	41
<b>Tabla 21:</b> Características y especificaciones técnicas del barómetro. ....	41
<b>Tabla 22:</b> Características y especificaciones técnicas del sensor potencial hídrico (succión). ....	42
<b>Tabla 23:</b> Características y especificaciones técnicas del sensor de humedad (10HS). ....	43
<b>Tabla 24:</b> Características y especificaciones técnicas piezómetro de cuerda vibrante. ....	43
<b>Tabla 25:</b> Características y especificaciones técnicas del extensómetro horizontal. ....	43
<b>Tabla 26:</b> Codificación de variables meteorológicas de la estación Guardiola de Berguedà. ....	44
<b>Tabla 27:</b> Verificación y calibración de los sensores geotécnicos en laboratorio e instalación en campo. ....	44
<b>Tabla 28:</b> Factores de calibración de los piezómetros. ....	46
<b>Tabla 29:</b> Parámetros de curva de retención estimados con el modelo Van Genuchten. ....	60
<b>Tabla 30:</b> Resumen de los métodos de equilibrio límite. ....	65
<b>Tabla 31:</b> Asignación de entidades para importar de Autocad a Slide. ....	70
<b>Tabla 32:</b> Resumen de parámetros resistentes del terreno. ....	71
<b>Tabla 33:</b> Resumen del Factor de Seguridad mediante cuatro métodos de rebanadas. ....	72
<b>Tabla 34:</b> Notación establecida para Code_Bright. ....	77
<b>Tabla 35:</b> Parámetros de los materiales para la modelación Termo-Hidráulico (TH). ....	87
<b>Tabla 36:</b> Condiciones iniciales para el modelo 2D. ....	89
<b>Tabla 37:</b> Valores de presión de líquido prescrito en la base del modelo 2D. ....	90
<b>Tabla 38:</b> Definición de condición de contorno atmosférico. ....	90
<b>Tabla 39:</b> Definición de condición de contorno atmosférico. ....	91

# 1 ASPECTOS GENERALES

## 1.1 Introducción

Los deslizamientos ocasionan muchos desastres en áreas pequeñas y de gran dimensión, originando daños en la infraestructura, ambiental y pérdida de vidas humanas. Actualmente, en algunos países los deslizamientos de laderas se tienen controlados mediante sistemas de refuerzo y monitorización adecuada.

De forma general, los movimientos de ladera son desplazamientos de masas de tierra o roca, que se desplazan en sentido de la pendiente abajo por efectos de la gravedad (Llorens y Masquef, 2009). Muchas investigaciones utilizan terminologías como movimiento de ladera o movimiento en masa, en inglés “Slope movement” y “Landslide” definidos por Varnes (1978) y Share (1938).

La clasificación de movimiento de ladera según su tipología es grande y compleja. Diferentes autores como Crunden y Varnes (1996), Corominas y García (1997), Varnes (1978), Highland y Bobrowsky (2008) han clasificado según el tipo de movimiento y la naturaleza de los materiales inestables (rocas, suelos y el relleno). Es decir, los mecanismos de rotura y propagación del movimiento, utilizando criterios morfológicos. Los autores citados anteriormente han clasificado en cinco tipos básicos los movimientos de ladera; 1) deslizamiento en suelo o roca “landslide”; 2) flujos o coladas de tierra “mud Flow” y corrientes de derrubio “debris Flow”; 3) desprendimiento de roca o suelo “rockfall”; 4) expansión lateral y 5) movimientos complejos.

De acuerdo a la clasificación de movimiento de ladera, la zona de estudio corresponde a un deslizamiento en suelo. La definición de deslizamiento consiste en movimientos de masas de tierra, hacia debajo de un talud o ladera (Cruden, 1991), estos movimientos se producen a través de una o varias superficies de rotura (Corominas y García, 1997; Varnes, 1978). Se puede diferenciar dos tipos de deslizamientos en función de la geometría de superficie de rotura como: deslizamiento traslacional cuando la superficie de rotura es un plano con inclinación constante y rotacional cuando la superficie de rotura es circular (Llorens y Masquef, 2009). La velocidad varía desde extremadamente lenta, <16 mm/año, hasta extremadamente rápida, 5 m/seg (Crunden y Varnes, 1996).

Los tipos de deslizamiento rotacional y traslacional se pueden diferenciar de la relación entre el espesor (D) y la longitud de superficie de falla (L). En el deslizamiento rotacional se cumple la siguiente condición  $0.15 < D/L < 0.33$ ; mientras para el deslizamiento traslacional la relación D/L es menor a 0.10 (Skempton y Hutchinson, 1969). El deslizamiento superficial en la zona de estudio se clasifica como deslizamiento de tipo traslacional. De forma general los movimientos de traslación comúnmente son controlados por estructuras geológicas como: fallas, juntas, planos de estratificación, foliación y en contacto entre la roca-suelo (Suárez, 2009). Además, se caracteriza por presentar la superficie de rotura a menor profundidad y su velocidad del movimiento usualmente es lenta (1.5 metros/mes) y moderada (1.5 metros/ día), en casos especiales puede alcanzar de forma rápida (Highland y Bobrowsky, 2008).

Los deslizamientos superficiales en laderas naturales pueden resultar debido a la lluvia, en donde el suelo se satura por infiltración, provocando el incremento en el nivel freático y cambio de presión intersticial en medio poroso. Por un lado, la configuración del relieve con pendientes pronunciadas que han permanecido estables durante muchos años pueden fallar repentinamente debido a cambios en la geometría, por erosión, formación de cárcavas, fuerzas externas y pérdidas de resistencia al corte (Abramson et al., 2002). También, la combinación de las precipitaciones



intensas, con pendiente elevada y las condiciones del suelo son factores críticos (Andrea et al., 2005).

Los factores influyentes en la inestabilidad de las laderas se consideran normalmente dos: factores condicionantes y factores desencadenantes. El factor condicionante está determinado por la geometría (altura e inclinación), geología, hidrogeología y comportamiento geotécnico. Mientras, el factor desencadenante depende de: cargas dinámicas, cambios hidrológicos, factores climáticos, que provocan roturas a lo largo de una o varias superficies de falla (Gonzalez de Vallejo et al., 2002). Por un lado, la estabilidad de laderas a largo plazo también se asocia a las influencias químicas que pueden disminuir la resistencia al corte (Taylor y Burns, 2006).

Los mecanismos de activación de un deslizamiento podría darse por dos razones principales: causas externas así como aumento de las fuerzas de corte y causas internas de disminución de la resistencia al corte (Terzaghi, 1950). También los aspectos atmosféricos como la precipitación y el régimen climático influyen en la estabilidad de un talud o ladera, debido a la interacción con el suelo, el contenido de agua del terreno se modifica. La alternancia de períodos de sequía y lluvia producen cambios en la estructura del suelo que dan lugar a la pérdida de resistencia (Gonzalez de Vallejo et al., 2002).

Los cambios climáticos causado por el calentamiento global han afectado los patrones de lluvia en todo el mundo, originando numerosas ocurrencias de deslizamientos superficiales y profundos. Las áreas tropicales son aún más propensa a deslizamientos inducidos por las precipitaciones (Rahardjo et al., 2010). Además, Rahardjo (2010) indica que la infiltración de agua de lluvia es de particular interés para gestionar los riesgos de estabilidad del talud. Por ello, las precipitaciones de alta intensidad causan mayores efectos en infiltración, generando el incremento de presión intersticial y que estas pueden causar problemas en la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad de laderas, existen varias metodologías y herramientas disponibles tales como: tablas o ábacos, análisis gráfico, cálculos manuales, hojas de cálculo y software. Esta última es capaz de resolver problemas complejos de forma eficiente. Suárez Días (2009) recomienda en lo posible utilizar siempre programas computacionales (software). Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de equilibrio límite, métodos numéricos y métodos dinámicos. Abramson et al. (2002) recomienda que los modelos deben ser realistas; para ello, se requiere conocer la geología, hidrología y las propiedades del suelo.

La instrumentación en laderas inestables es una tarea fundamental para entender el comportamiento del terreno y sus mecanismos de rotura. El registro de datos in-situ contribuyen una información primordial para calibrar los modelos numéricos, con ello, los resultados son más realistas. Por otra parte, la auscultación tiene dos objetivos: 1) conocimiento científico y 2) la parte social, que es accionar sistemas de alerta y alarma para mitigar los riesgos (Hürlimann et al., 2013).

El presente trabajo fin de máster (TFM) consiste en realizar el análisis geotécnico de un deslizamiento superficial en Cercs (Prépirineo Catalán), situado en el margen izquierdo del río Peguera y a unos 600m del municipio de Sant Jordi de Cercs. Para ello, se cuenta con registros de datos meteorológicos del 2015 al 2019. También, se cuenta con los registros piezométricos, medidas de desplazamiento horizontal, succión, contenido volumétrico de agua y temperatura del suelo, éstos obtenidos a partir de sensores auscultados en la zona de deslizamiento.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general en este trabajo es realizar el análisis geotécnico de un deslizamiento superficial en Cercs (Prépirineo Catalán). Para ello, se ha planteado unos objetivos específicos:

- Complementar la auscultación de piezómetro y extensómetro en la zona de deslizamiento con previa verificación y calibración de los instrumentos en laboratorio.
- Realizar la cartografía geológica-geomorfológica de la zona de estudio para mejorar el modelo geológico.
- Determinar las propiedades físicas, resistentes e hidráulicas de los materiales que conforman la ladera de Cercs.
- Controlar y analizar los datos meteorológicos y de los sensores geotécnicos.
- Realizar el análisis de estabilidad en condiciones actuales y en condiciones críticas.
- Modelar la interacción suelo-atmósfera mediante elementos finitos y contrastar con los datos obtenidos a partir de sensores geotécnicos.

## **1.3 Metodología general de trabajo**

Se ha realizado diferentes trabajos con el fin de llegar a los objetivos planteados. La metodología utilizada comprende de cuatro etapas, a continuación, se describe de forma breve.

Etapas-I: Consiste en la verificación y calibración de sensores geotécnicos en laboratorio.

Etapas-II: Contempla los trabajos de campo, tales como: cartografía geológica, ejecución de sondeos manuales, instalación de sensores geotécnicos y toma de muestras de suelo.

Etapas-III: Comprende trabajos en laboratorio para caracterizar las muestras provenientes de campo. Se realizaron los siguientes ensayos: identificación básica (granulometría y límites de Atterberg), ensayo de corte directo y ensayo de permeabilidad por carga variable.

Etapas-IV: Consiste trabajo en gabinete. En el cual se realizaron diferentes actividades tales como: recopilación, análisis e interpretación de los registros obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran auscultados en la zona de estudio; análisis de estabilidad por equilibrio límite en software Slide y modelación termo-hidráulica en Code\_Bright para comparar los resultados del modelo vs datos medidos.

## **1.4 Estructura del documento**

El presente documento de TFM se ha dividido en siete capítulos. El primer capítulo comprende de aspectos generales como: introducción, objetivos y metodología. A continuación, se describe de forma general el contenido del capítulo 2 al 7.

En el capítulo 2 se presenta los trabajos realizados en campo (ladera Cercs) como: levantamiento de fotogrametría digital del terreno mediante el DRON y obtención de modelo digital de elevaciones del terreno DEM; también, se presentan los mapas de cartografía geológico-geomorfológico realizado a escala 1:500. Además, se describen los perfiles estratigráficos o capas de los suelos caracterizados durante la ejecución de sondeos manuales y por último se describe el proceso de auscultación de los sensores geotécnicos (piezómetro y extensómetro).

El capítulo 3 trata la caracterización geotécnica del material; en el cual, se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para determinar las propiedades físicas, resistentes e hidráulicas en las tres capas del suelo (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada) que conforma la ladera de Cercs. También, se ha recopilado los resultados de ensayos en estudios

anteriores; con el fin de complementar a los resultados obtenidos; finalmente, estimar los parámetros adecuados para cada material.

En el capítulo 4 se describe la ubicación, el sistema de auscultación y descripción de sensores geotécnicos que se encuentra en la estación SLOPE y METEO. Ambas, estaciones se encuentran en la ladera de Cercs, aunque la estación SLOPE está situada en la masa de coluvión deslizado. Por un lado, se detalla la etapa de verificación y calibración de sensores geotécnicos en laboratorio de 02 piezómetros, extensómetro y el mejoramiento del sensor MPS-2. Finalmente, se presenta la evolución de medidas adquiridas in-situ mediante diferentes sensores o instrumentos como: la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua, potencial hídrico (succión), temperatura de ambiente, precipitación, entre otros; también, se presenta los resultados de parámetros de curva de retención en proceso de secado.

En el capítulo 5 se trata de análisis de estabilidad mediante equilibrio límite; el cual, comprende de dos partes: En la primera parte se ofrece un resumen de justificación teórica a cerca de principios y métodos de equilibrio límite. Mientras, la segunda parte trata de análisis de estabilidad del deslizamiento existente (Cercs) en condiciones actuales y en condiciones críticas variando el nivel freático; también, se presenta el análisis de sensibilidad paramétrica del ángulo de rozamiento interno para condición residual y finalmente se describe el análisis retrospectivo.

El capítulo 6 contiene a cerca de modelación Termo-Hidráulico (TH) en Code\_Bright; para ello, en la primera parte se presenta un enfoque de la formulación matemática a cerca de las ecuaciones que gobiernan, ecuaciones de balance, ecuaciones constitutivas, restricciones de equilibrio, condición de contorno del flujo y condiciones atmosféricas (flujo de masa y energía). La segunda parte trata de la implementación del modelo TH en la ladera natural en Cercs; en el cual, se presenta dos modelos: 1) modelos unidimensionales 1D y 2) bidimensional 2D (escala real de la ladera). En ambos modelos se ha simulado para 48 meses (4 años) correspondiente desde enero del 2015 a diciembre del 2018, con discretización del tiempo en días. Finalmente, se presentan los resultados de la simulación en Code\_Bright comparando las medidas de campo; tales como, temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua, presión de líquido y cálculo de factor de seguridad.

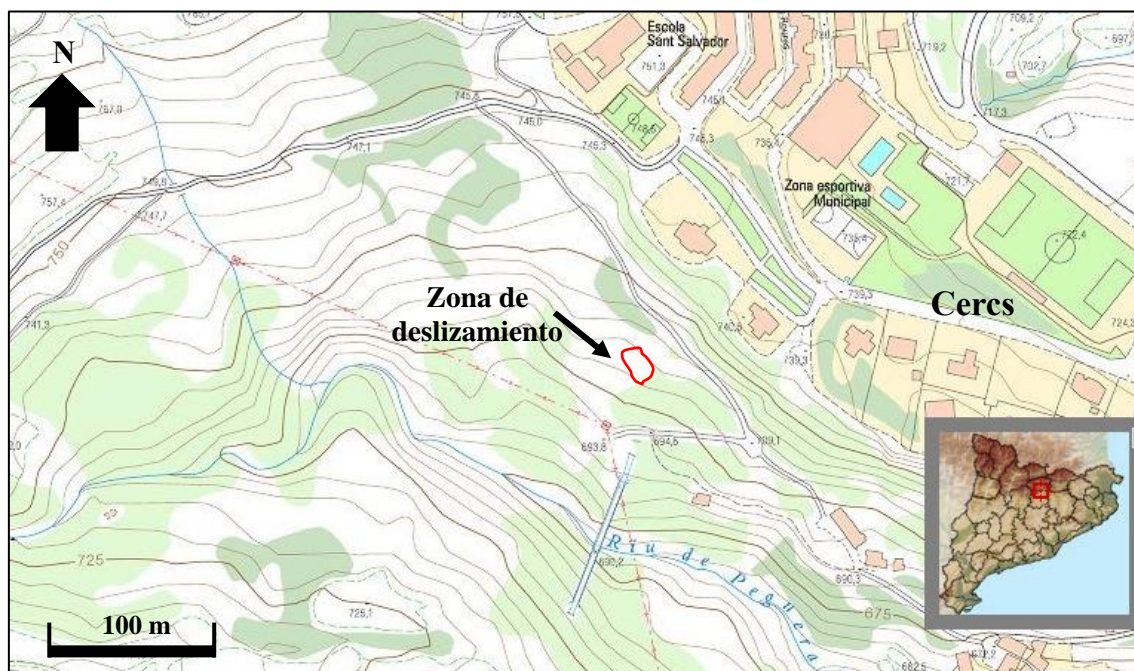
Finalmente, el capítulo 7 contiene las conclusiones del presente trabajo fin de máster y líneas de trabajo futura.

## 2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Ubicación

Geográficamente la zona de estudio se encuentra situada en el Poblado de Sant Jordi en Cercs, perteneciente a la comarca de Berguedà, provincia de Barcelona. Como se ilustra en la Figura 1. Es accesible por una vía terrestre desde la ciudad de Barcelona-Berga-San Jordi de Cercs y viceversa.

La ladera que se estudia se sitúa exactamente en el margen izquierdo del río Peguera que drena hacia la presa de Baells; a 600 metros del municipio de Sant Jordi de Cercs, en dirección hacia el Sur.



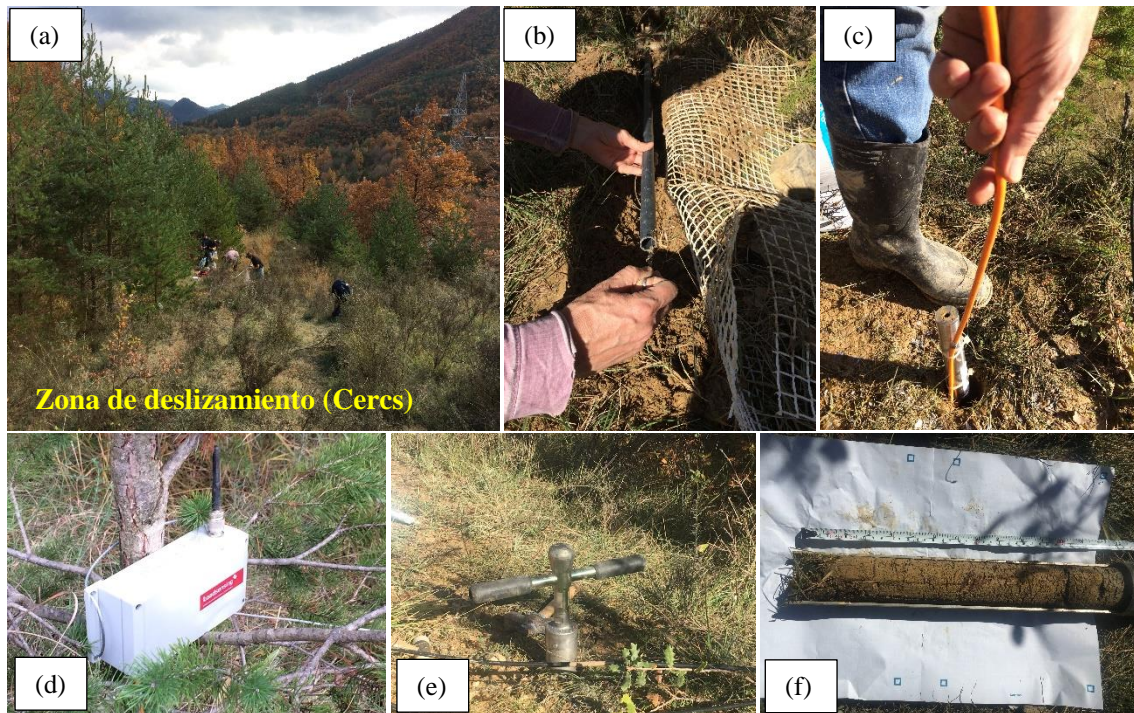
**Figura 1:** Ubicación de la zona de estudio (ICGC, 2018).

### 2.2 Trabajos de campo

El trabajo de campo se realizó en dos campañas. En la primera campaña se realizaron los siguientes trabajos: 1) fotogrametría digital del terreno; 2) ejecución de dos sondeos manuales; 3) instalación de piezómetros de cuerda vibrante y extensómetro horizontal. También, durante los sondeos se obtuvo muestras alteradas e inalteradas para realizar ensayos de laboratorio. En la Figura 2 se aprecia los trabajos de campo.

En la segunda campaña de campo se realizó el cartografiado geológico y geomorfológico en la zona de deslizamiento a una escala 1:500. También, se instaló un convertidor SDI-12 de modelo 4015 para el mejoramiento del sensor MPS-2 que se encuentra auscultado a 23 cm de profundidad respecto a la superficie.



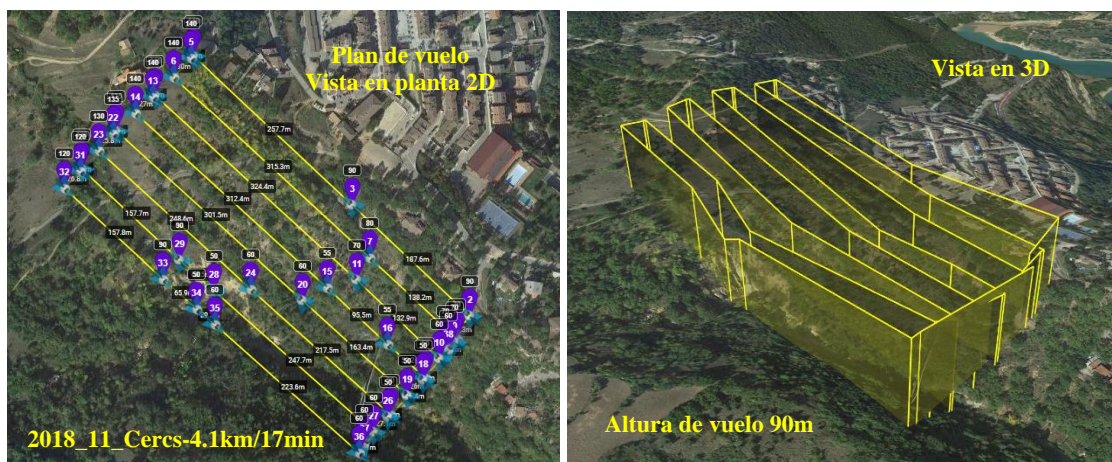


**Figura 2:** Trabajos de campo; b y c) Instalación de extensómetro y piezómetro, (d) Almacenamiento de datos (data logger), (e) Ejecución de sondeo manual y (f) Obtención de la muestra.

### 2.3 Fotogrametría digital del terreno

La fotogrametría digital del terreno se realizó mediante el empleo de un DRON conocido técnicamente UAV (Unmanned Aerial Vehicles) en castellano “Vehículos Aéreos No Tripulados”. UPC cuenta con este vehículo aéreo de la marca DJI, modelo INSPIRE 2, con la cámara X5S, con sensor CMOS de 4/3”. La resolución de la cámara 20.8 Mpx (en formato 4:3 5280x3956 pixeles). La óptica cuenta con una apertura de 72° (DJI MFT 15mm/1.7 ASPH).

El vuelo se realizó a una velocidad de 20 km/h a una altura aproximadamente de 90 metros respecto a la superficie del terreno; también en la ladera inclinada con variaciones de cota el DRON se adapta a 90m de altura. En total se ha cubierto 11.87 ha de área, 4.1 km de longitud total y 17 minutos el tiempo de vuelo. En la Figura 3 se puede apreciar el plan de vuelo y vista isométrica.



**Figura 3:** Plan de vuelo (lado izquierdo) y vista isométrica 3D altura de vuelo (lado derecho).



En seguida, las fotografías del terreno se han reconstruido mediante nube de puntos 3D tratadas en el software de fotogrametría; obteniendo un modelo digital de elevaciones (DEM) en formato ráster. A partir de este último se ha generado el mapa de pendientes, curvas de nivel y perfil del terreno.

## 2.4 Descripción de geología regional y cartografía geológica a detalle

### 2.4.1 Geología regional

La zona de estudio (Cercs) se encuentra al norte de la provincia de Barcelona y en el centro de Berguedà. Los rasgos geomorfológicos de la zona se caracterizan por presentar su relieve abrupto, dominado por un paisaje montañoso dentro de la sierra de Cadí y Prepirenaica conformada por los Rasos de Peguera y la Sierra de Ensija. Al Oeste de la zona de estudio, limita con la Sierra de Rasos de Peguera, donde las cumbres alcanzan 2061msnm de altitud; mientras al Este delimita con la presa de la Baells, y su altitud es 600 msnm. Estas cumbres de Berguedà se formaron durante el Terciario como resultado de la colisión entre las placas tectónica Europea e Ibérica (RPOUM, 2010).

La parte estructural se encuentra con plegamientos (anticlinales y sinclinales), con fallas normales e inversas con categoría distinta (mayores y menores). En la cartografía de (ICGC), se observa tres sistemas principales Este-Oeste, Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste. La estratificación de las rocas sedimentarias tiene un rumbo de  $N40^{\circ}-60^{\circ}O$  con un buzamiento de  $40^{\circ}-50^{\circ} NE$  como se puede ver en la Figura 4.



Figura 4: Geología regional de la zona de estudio. Fuente: ICGC.

Los afloramientos de macizos rocosos que se exponen en la zona de estudio corresponden a la unidad geológica denominada “Sierras Interiores del Pré-pirineo”. Estos afloramientos comprenden principalmente a las siguientes unidades lito estratigráficas que se describen a continuación de lo más antiguo a reciente, de acuerdo a la información geológica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) en la Figura 4 ilustra el mapa geológico.

- Margas y calizas margosas (Tk), es una roca sedimentaria de facies Keuper del triásico superior, era mesozoica.
- Margas grises (KMm), con intercalaciones de calizas margosas y calcarenitas del período cretáceo, era mesozoica.
- Calizas bioclásticas (KMc), secuencia sedimentaria del período cretáceo y era mesozoica.
- Calizas, lutitas y margocalizas (Kgp), de facie Garumna, del período cretáceo, era mesozoica.
- Calizas micríticas (PPcm1), secuencia de facie Garumna, calizas de Valcebre, roca sedimentaria del período paleógeno, era cenozoica.
- Conglomerados masivos (PEcgb5), luteciense superior, secuencia de sedimentación en el período paleógeno, era cenozoica.
- Depósitos recientes como: aluviales, coluviales, eluviales, etc. se encuentran depositados en las partes bajas cubriendo parcialmente a los macizos de basamento.

## **2.4.2 Geología local**

El cartografiado geológico es uno de los aspectos más importantes para entender el comportamiento de la geodinámica en la zona de estudio. El trabajo consistió en hacer un cartografiado a una escala de 1:500 sobre un plano topográfico a detalle con curvas de nivel a 0.20m; en el cual, se realizó la identificación de los geo-materiales y los procesos geomorfológicos que presenta la ladera y zonas adyacentes.

### **2.4.2.1 Geomorfología**

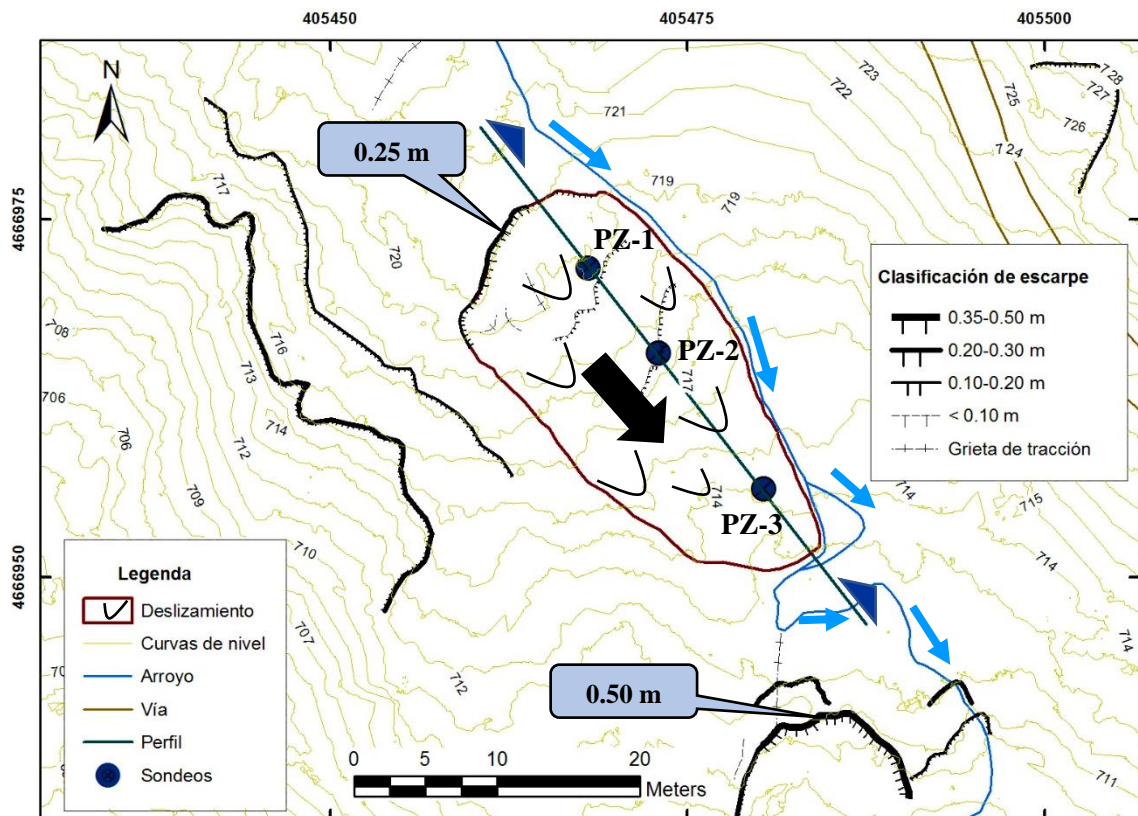
La zona de estudio se encuentra en un valle fluvial asimétrico y en el fondo del valle existe un río llamado Peguera que drena hacia la presa de Baells. Los laterales del valle se diferencian por su pendiente; es decir, en el margen derecho presenta pendientes entre 45-55°, mientras en el margen izquierdo donde se encuentra el deslizamiento la pendiente varía entre 10-30°.

El relieve actual que presenta la zona de deslizamiento es resultado de factores geográficos que ocasionan el proceso de descomposición y degradación del macizo formando de esta manera capas de argilitas alteradas. Los factores más importantes considerados en la ladera de Cercs son agentes atmosféricos como: la lluvia, la temperatura, el viento, la radiación y la humedad relativa. También, la escorrentía superficial que se sitúa en la parte izquierda del cuerpo del deslizamiento ver la Figura 5.

La zona estudiada se considera una zona activa en términos de la geodinámica, propensos a producirse un deslizamiento de forma progresiva. Durante la cartografía geológica-geomorfológica se han registrado varias cicatrices de grietas de tensión y escarpes con desniveles que varía desde 0.10 a 0.50m.

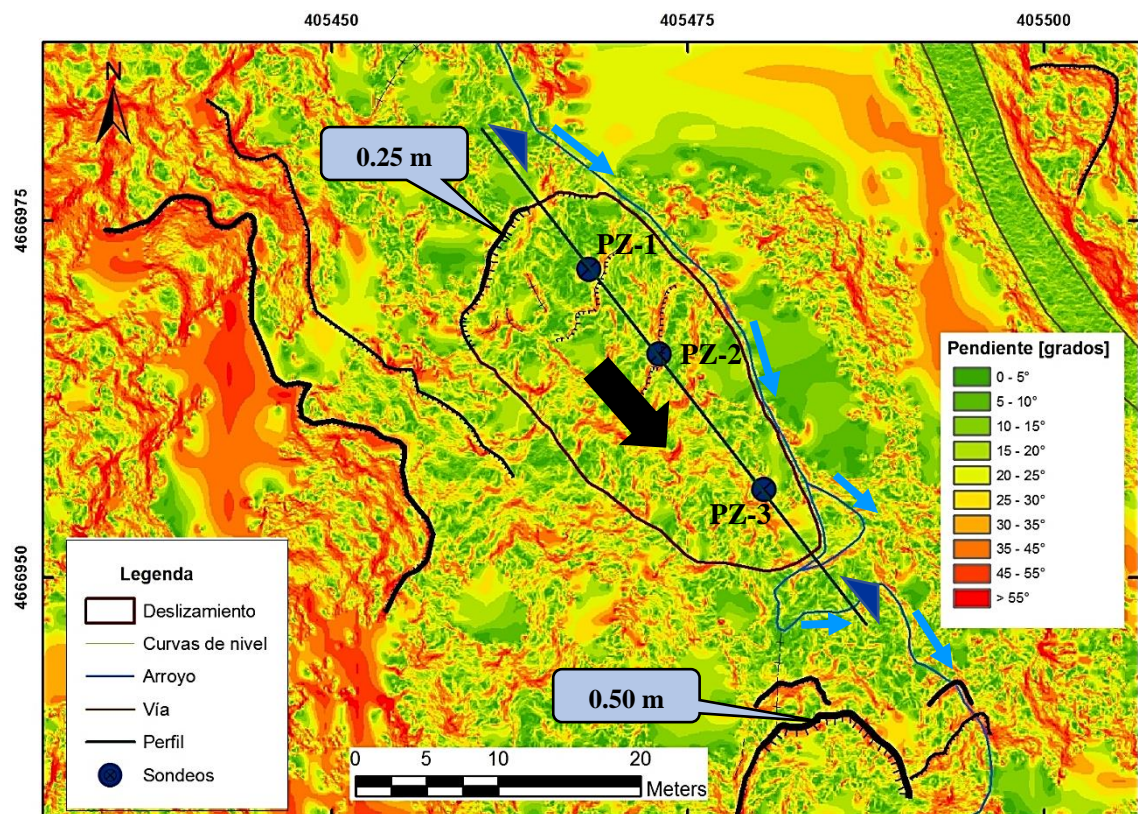
El deslizamiento estudiado, en su cabecera se registra un escarpe de 0.25m de desnivel y no se observó movimientos recientes; sin embargo, en la parte Sur (Figura 5) se registra un escarpe que varía desde 0.30 - 0.50m de desnivel con movimientos recientes; mientras el escarpe que se encuentra en el lado Oeste (Figura 5) tampoco muestra movimientos.





**Figura 5:** Mapa geomorfológico de la zona de deslizamiento existente en Cercs.

En la Figura 6 se presenta el mapa de pendientes; en el cual, se muestra en el lado Oeste pendientes mayores a 35°; mientras en la zona de deslizamiento estudiado las pendientes son menores y varían entre 10-25°, por ello, el deslizamiento existente se mantiene estable.



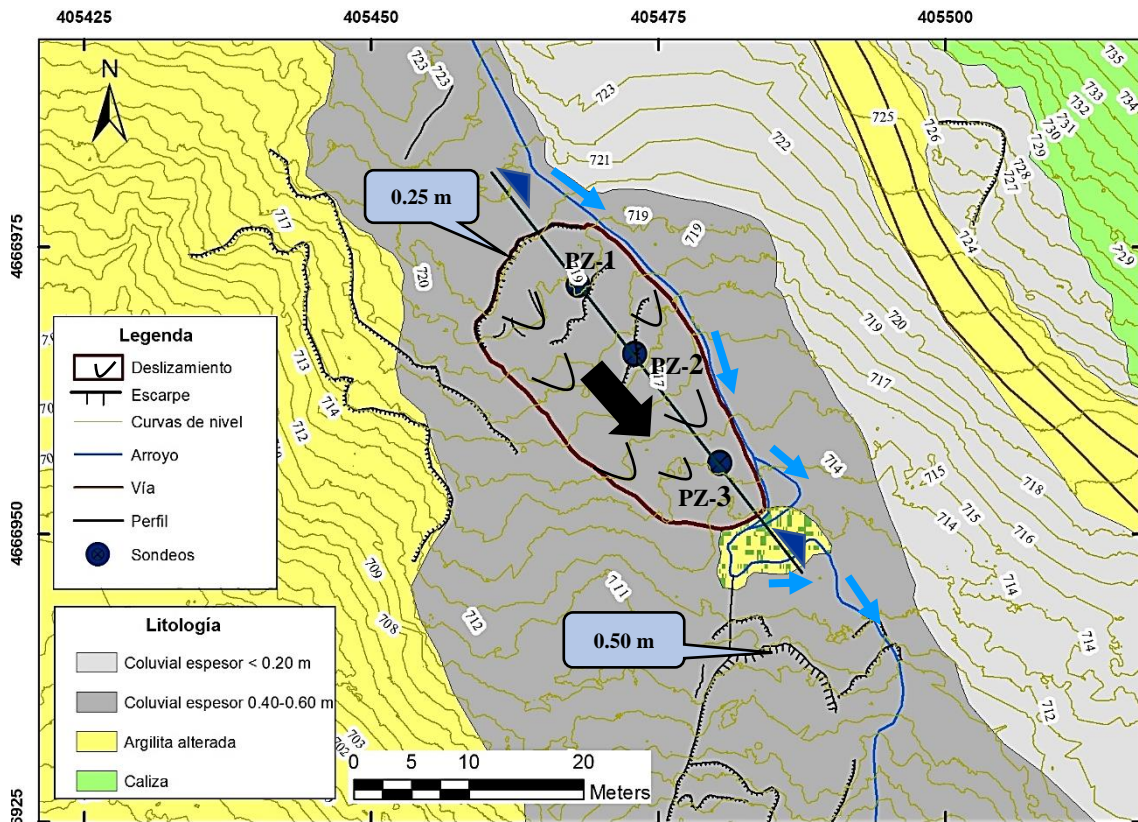
**Figura 6:** Mapa de pendientes de la zona de deslizamiento existente en Cercs.



### 2.4.2.2 Litología

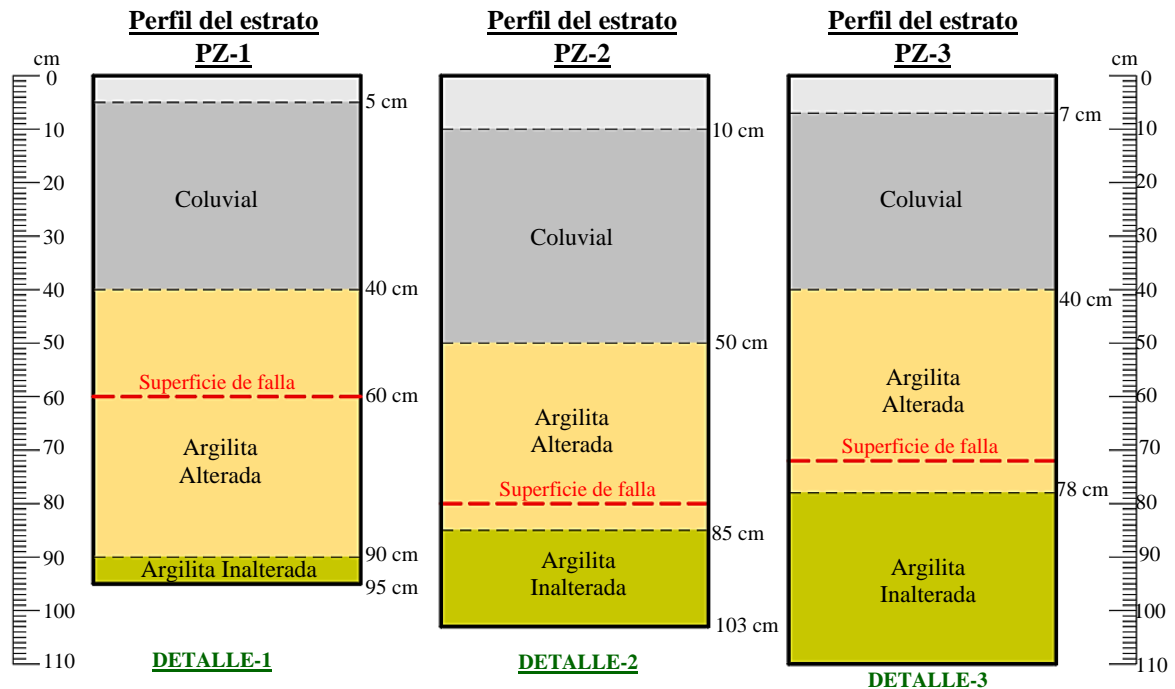
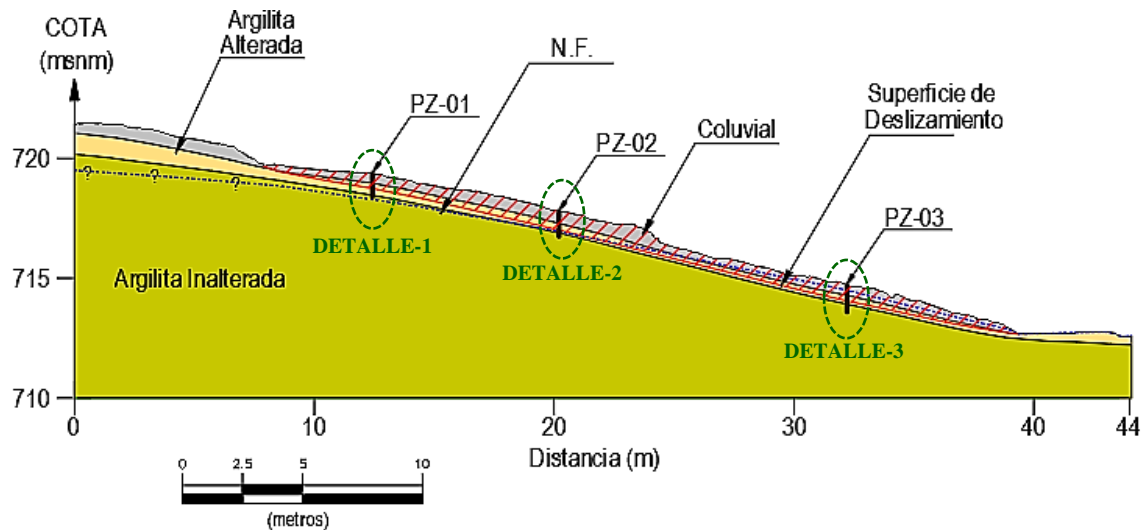
El área estudiada se caracteriza por la existencia de un substrato, fundamentalmente arcilloso. Mientras el basamento rocoso corresponde a la secuencia deposicional de lutitas del Permo-Triásico, arcillas y calizas del Keuper en las facies Garumniense del Cretáceo Superior, con intercalación de lutitas, areniscas rojas con niveles de lignitos y yesos. Este basamento rocoso se encuentra cubierto parcialmente por suelos residuales, depósitos coluviales y derrubios.

Durante la cartografía geológica se ha identificado cuatro materiales, tales como: 1) Caliza del Keuper que aflora en la parte más alta en forma de estratos; 2) Suelo residual que se encuentra expuesto en el lado Oeste del deslizamiento, con espesores muy variables desde 0.10 a 0.50m; y a este suelo se ha denominado como argilitas alteradas producto de la meteorización del macizo; 3) depósito coluvial constituido por una arcilla de plasticidad baja, húmeda, color marrón claro a rojizo, el espesor varía de 0.40 a 0.60m y se encuentra expuesto por zona de deslizamiento donde las pendientes son bajas entre 10-25° y 4) depósito coluvial con un espesor menor a 0.20m que se encuentra en pendientes que varía entre 35-45°. En la Figura 7 se presenta el mapa geológico de la zona de deslizamiento en Cercs.



**Figura 7:** Mapa geológico de la zona de deslizamiento en Cercs.

En la Figura 8 se muestra el modelo geológico construido a partir de tres sondeos (PZ-1, PZ-2 y PZ-3) manuales; en el cual se ha identificado tres estratos principales como: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada; el detalle de cada sondeo se muestra en la figura siguiente.



**Figura 8:** Modelo geológico de la zona de deslizamiento en Cercs y detalle de los sondeos.

## 2.5 Sondeos manuales

El sondeo PZ-1 fue realizado en primavera del 2013. Mientras los sondeos PZ-2 y PZ-3 se han realizado en noviembre del 2018 con varios objetivos: 1) Identificación de superficie de rotura y caracterización macroscópica de los materiales; 2) obtención de muestras para el ensayo en laboratorio; 3) aprovechar el hoyo del sondeo para la instalación del piezómetro de cuerda vibrante. La profundidad de los sondeos varía en 95 a 110 cm, con diámetro de 6 cm. En la Tabla 1 se detalla la ubicación de los sondeos en coordenadas ETRS89/UTM Zona-31N.

Las muestras extraídas del sondeo se han colocado en porta muestras para evitar la pérdida de humedad y propiedades físicas, para ensayos de corte directo y permeabilidad. El resto de las muestras alteradas fueron colocadas en las bolsas de muestreo para ensayos de identificación granulométrica y límites de Atterberg.

**Tabla 1:** Ubicación de los sondeos manuales.

Sondeo	Coordenadas UTM		Cota (msnm)	Prof. (cm)	Prof. Piezómetro (cm)	Año de ejecución
	Este	Norte				
PZ-1	405468	4666972	716.90	103	85	2013
PZ-2	405473	4666966	715.20	103	84	2018
PZ-3	405480	4666956	712.30	110	90	2018

Nota: Las coordenadas están expresadas en ETRS89/UTM Zona-31N., zona 31N. Los tres sondeos son verticales. El sondeo PZ-1, fue realizado en 2013 por Marcel Hürlimann.

### 2.5.1 Sondeo PZ-2

El sondeo PZ-2 se realizó el 18 de noviembre del 2018 en la zona intermedia del deslizamiento, a una cota de 715.20 msnm. Este sondaje ha sido ejecutado con fines de investigación como: identificar los estratos in situ, toma de muestras para el ensayo de laboratorio e instalación de piezómetro de cuerda vibrante. A continuación, se describe macroscópicamente los estratos interceptados:

0.00 a 0.10 m Suelo vegetal. Arcilla limosa, marrón oscuro, con mucha presencia de raíces.

0.10 a 0.50m Coluvial. Arcilla de plasticidad baja, húmeda, color marrón claro a rojizo. Tamaño máximo de grava menores de 1.5 cm de diámetro compuesta por lutitas deleznales.

0.50 a 0.85 m Argilita Alterada. Conformada de arcilla de plasticidad media, húmeda, color marrón rojizo. La superficie de rotura se localiza en 0.75 – 0.85 metros, mostrándose estrías como se puede observar en la Figura 9.

0.85 a 1.03m Argilita Inalterada. Arcilla inorgánica de alta plasticidad, húmeda, marrón rojizo.

### 2.5.2 Sondeo PZ-3

El sondeo PZ-3 se realizó el 18 de noviembre del 2018 en el pie del deslizamiento, a una cota de 712.30 msnm. Este sondaje se ha realizado para identificar los estratos, toma de muestras para el ensayo de laboratorio e instalación de piezómetro. A continuación, se describe macroscópicamente los estratos interceptados:

0.00 a 0.07 m Suelo vegetal. Arcilla limosa, marrón oscuro, presencia de vegetación.

0.07 a 0.40 m Coluvial. Arcilla de plasticidad baja, húmeda, de color marrón.

0.40 a 0.78m Argilita Alterada. Arcilla inorgánica de plasticidad media, saturada, color marrón oscuro a rojizo, la superficie de falla se localiza entre 0.65 – 0.78 metros.

0.78 a 1.10 m Argilita Inalterada. Arcilla inorgánica de alta plasticidad, saturada, color marrón rojizo.



**Figura 9:** Identificación de la superficie de rotura en argilita alterada. PZ-2 prof. 80 cm.

## 2.6 Instalación de sensores geotécnicos in-situ

### 2.6.1 Instalación de piezómetro de cuerda vibrante

En el hoyo de sondeos manuales (PZ-2 y PZ-3) se realizó la auscultación de piezómetros de cuerda vibrante de fabricación GEOSENSE VWP-3200, con N° serial 334250 y 334251 respectivamente. A continuación, se detalla los pasos de instalación.

Primero realizar la lectura cero; la cual consistió en colocar el piezómetro en una cubeta con agua retirando su filtro respectivo y se dejó aproximadamente por una hora para que se sature los filtros con agua. Posteriormente, se realizó tres lecturas de presión en Hertz (Hz), temperatura en Ohms y la presión atmosférica en mbar. La lectura base se realizó retirando el piezómetro del agua y sin filtro. Después, se colocó los filtros bajo el agua y se dejó hasta preparar el sondeo. En la siguiente tabla se encuentra resumida la lectura base.

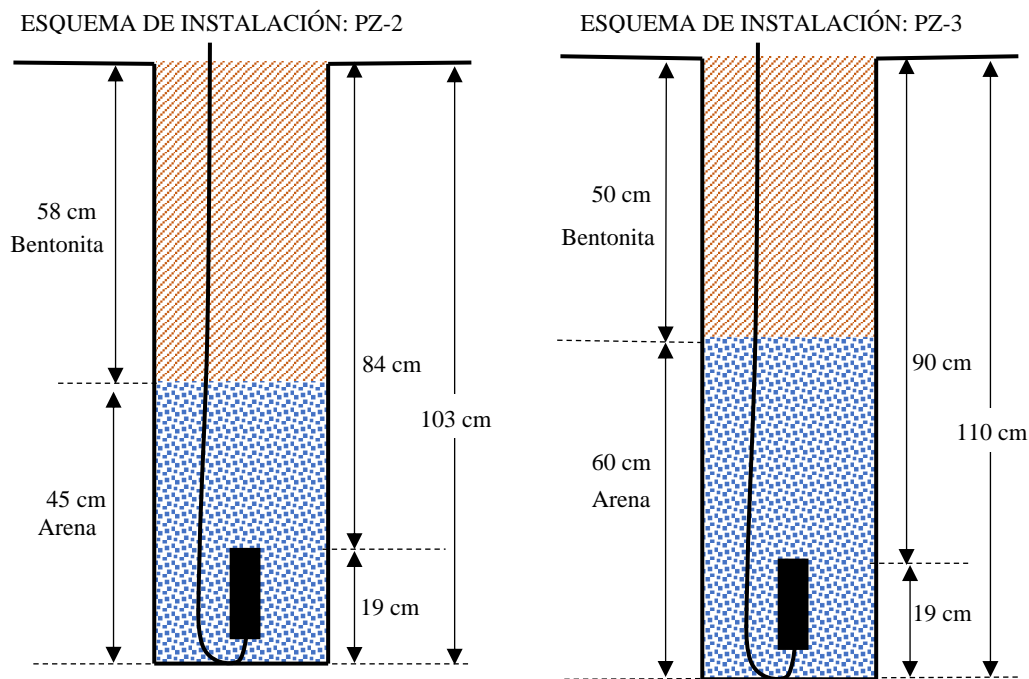
**Tabla 2:** Promedio de tres lecturas iniciales transformadas en unidades ingenieriles.

Piezómetro	Presión [dígitos]	Temperatura [°C]	Barómetro [kPa]	Comentario
PZ-2	9380.039409	16.44	93.746667	Lectura inicial
PZ-3	9263.811410	20.70	93.716667	Lectura inicial

Nota: Estos valores se usan para lecturas posteriores de los transductores.

Al culminar el sondeo, fue verificada la profundidad con un flexómetro, luego se ha vertido gravilla de cuarzo 1/16" de diámetro, elevando aproximadamente 5 cm de altura. En seguida, se ha retirado el piezómetro del agua y se ha introducido en el hoyo de perforación verificando la profundidad, y luego se ha vertido nuevamente la gravilla de cuarzo unos 45 a 60 cm de altura (ver la Figura 10). Finalmente, después de la gravilla se ha vertido bentonita para impedir las filtraciones desde superficie. Mientras, la gravilla cumple la función de filtro.

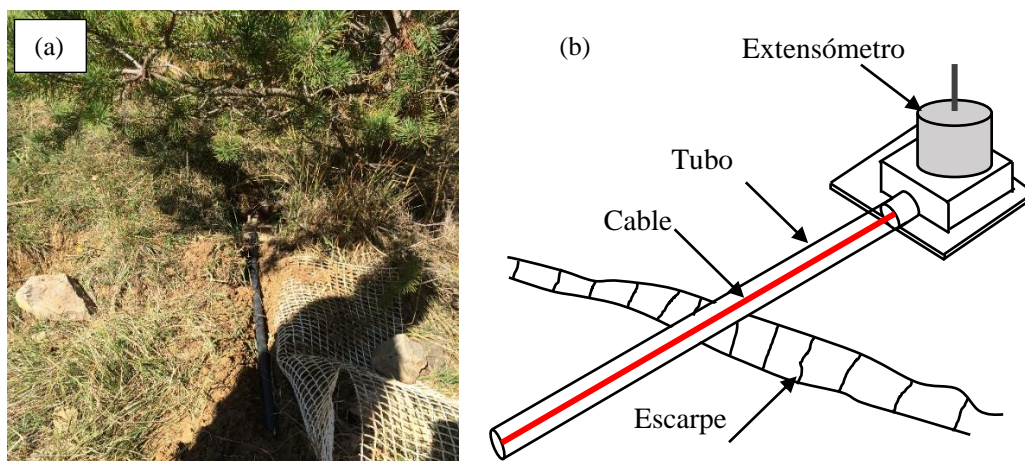




**Figura 10:** Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante en sondeos PZ-2 y PZ-3.

### 2.6.2 Instalación de extensómetro horizontal

La instalación del extensómetro horizontal se ha realizado en la cabecera del escarpe, esto con el objetivo de medir los desplazamientos que podría presentarse en el tiempo. La lectura inicial del extensómetro fue de 0.0012545 Voltios a una longitud de 1.285m de cable. El cable es protegido mediante un tubo PVC como se ilustra en Figura 11(b).



**Figura 11:** (a) Instalación de extensómetro en Cercs. (b) Diagrama de instalación del extensómetro.

### 2.6.3 Instalación del convertidor SDI-12 para el sensor MPS-2

En la segunda campaña de campo se efectuó el cambio de sistema en adquisición de datos en el sensor MPS-2, que se encuentra auscultado a 23 cm de profundidad respecto a la superficie; el cual consistió en reemplazar un nuevo equipo data logger conectado a un conversor SDI-12 del modelo 4015 y conectado al sensor MPS-2. El objetivo principal fue para lograr la configuración con la tecnología de Gateway que envía los datos al servidor de UPC, además, se puede visualizar las medidas a tiempo real desde un ordenador sin la necesidad de ir al campo.

### 3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MATERIAL

Durante la campaña de campo se han recolectado 9 muestras de suelo a partir de sondeos manuales; de las cuales, 3 muestras para corte directo, 3 muestras para ensayos de permeabilidad y 3 muestras para identificación básica (granulometría y límites de Atterberg). En la Tabla 3 se muestra los detalles y la profundidad de las muestras. Los ensayos se han realizado en el laboratorio de mecánica de suelos GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.

El objetivo principal de ensayo de laboratorio fue para determinar los parámetros físicos, resistentes y conductividad hidráulica de cada estrato (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada). Los parámetros resultantes de cada estrato se usarán en el análisis de estabilidad por equilibrio límite y en la modelación termo-hidráulico en Code\_Bright.

**Tabla 3:** Resumen de muestreo para el ensayo de laboratorio.

Sondaje	Profundidad [cm]	Corte Directo	Permeabilidad	Identificación	Estrato	Comentario
PZ-2	15 – 40			Si	Coluvial	Muestra alterada
PZ-2	31 - 35		Si		Coluvial	Muestra inalterada
PZ-2	55 – 59		Si		Arg. Alterada	Muestra alterada
PZ-2	65 – 77	Si			Arg. Alterada	Muestra alterada
PZ-2	85 – 103			Si	Arg. Inalterada	Muestra alterada
PZ-3	23 – 35	Si			Coluvial	Muestra inalterada
PZ-3	40 – 78			Si	Arg. Alterada	Muestra alterada
PZ-3	90 - 94		Si		Arg. Inalterada	Muestra inalterada
PZ-3	100 - 110	Si			Arg. Inalterada	Muestra inalterada

Nota: Si equivale a un ensayo.

#### 3.1 Ensayos de identificación

##### 3.1.1 Análisis granulométrico

El ensayo granulométrico por tamices se ha realizado en 3 muestras: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. El ensayo se realizó de acuerdo a la norma UNE 103-101-1995 y el procedimiento se describe en el Anexo 2. El objetivo del ensayo fue para clasificar el suelo de acuerdo al tamaño de las partículas y los resultados del tamizado se detallan en la Tabla 4.

El suelo coluvial de acuerdo al análisis granulométrico está formado 7% de grava (entre 5.0 – 12.5 mm), 18% de arena (entre 0.075 – 5.0 mm) y 75% contenido de finos limo y arcillas (menores a 0.075 mm). Para el estrato de argilita alterada solo se tiene el 1.2% de grava (entre 5.0 – 6.3 mm), 13.5% de arena (entre 0.075 – 5.0 mm) y 85.3% contenido de finos menores (0.075mm). Para la argilita inalterada es muy similar a argilita alterada grava de 2.4%, arena de 12.1% y contenido de finos 85.5%.

**Tabla 4:** Análisis granulométrico de la zona de deslizamiento en Cercs.

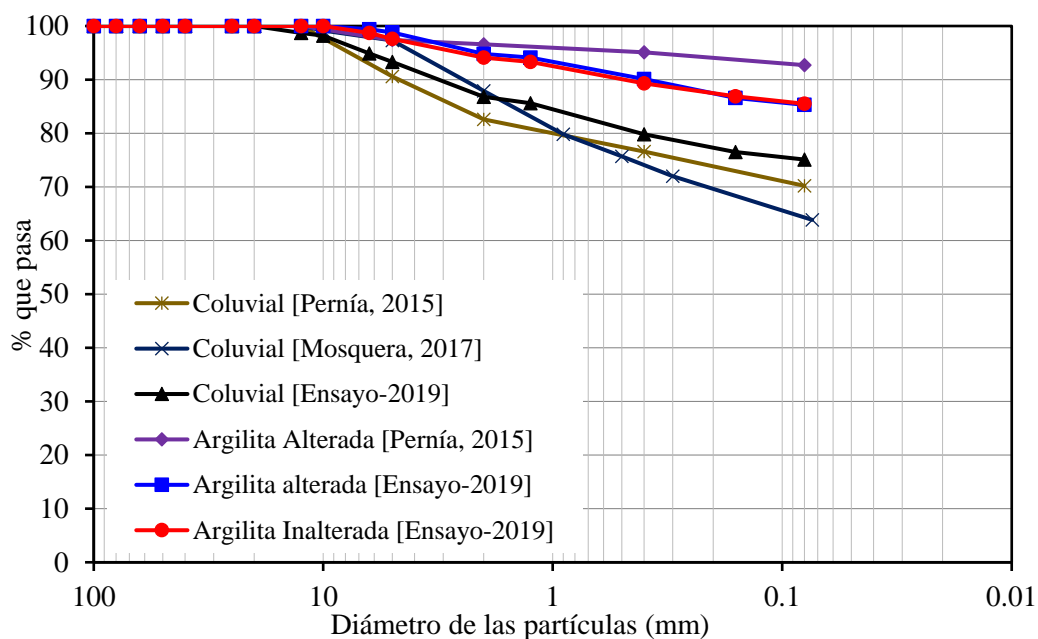
Tamices UNE (mm)	Coluvial		Argilita Alterada		Argilita Inalterada	
	Peso Retenido (gr)	% que pasa	Peso Retenido (gr)	% que pasa	Peso Retenido (gr)	% que pasa
25	0.00	100.00	0.00	100.0	0.00	100.0
20	0.00	100.00	0.00	100.0	0.00	100.0
12.5	3.88	98.70	0.00	100.0	0.00	100.0
10	1.80	98.20	0.00	100.0	0.00	100.0
6.3	10.26	94.90	0.81	99.4	1.32	98.7
5	4.70	93.30	0.74	98.8	1.21	97.6
2	20.30	86.80	5.34	94.8	3.74	94.1
1.25	3.79	85.60	1.03	94.1	0.81	93.3
0.4	17.95	79.80	5.30	90.1	4.18	89.3
0.16	10.05	76.50	4.64	86.6	2.54	86.9
0.075	4.34	75.10	1.76	85.3	1.52	85.5

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma Española (UNE 103-101, 1995).

Por un lado, se han recopilado los resultados de ensayo granulométrico realizado en trabajos anteriores de Pernía (2015) y Mosquera (2017) efectuado en suelo coluvial y argilita alterada. Los resultados de trabajos anteriores y resultados actuales se presentan en un gráfico siguiente (ver Figura 12) denominado curva de distribución de tamaño de las partículas.

Las curvas resultantes muestran una diferencia notable entre coluvial y argilitas. Sin embargo, entre la argilita alterada y argilita inalterada parece tener el mismo comportamiento en la distribución de tamaño de granos, donde el contenido de finos para ambos es de 85%. Mientras, en el trabajo de Pernía (2015) la argilita alterada tiene mayor contenido de finos > 90%.

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el estrato coluvial corresponde a una arcilla inorgánica (CL); también, el estrato argilita alterada corresponde a arcilla inorgánica de plasticidad baja (CL). Y el estrato de argilita inalterada corresponde a arcilla inorgánica de plasticidad alta (CH).



**Figura 12:** Curva de distribución de tamaño de las partículas.

### 3.1.2 Límite de Atterberg

Este ensayo consiste en variar el contenido de humedad en un suelo fino, cuyo objetivo es para encontrar la relación que existe entre el contenido de humedad y la consistencia del suelo. Para ello, se ha realizado tres ensayos de límite líquido y límite plástico, para caracterizar los materiales como: coluvial, argilita alterada e inalterada. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma UNE 103-104-1993 y UNE 103-103-1994. Los detalles del ensayo se encuentran en el Anexo 2.

El límite líquido ( $\omega_L$ ) es el contenido de humedad específico que se encuentra entre el estado de consistencia plástico y líquido. Para la determinación del límite líquido se utilizó la cuchara de Casagrande. El ensayo se realizó siguiendo la norma UNE 103-103-1994 y los resultados se encuentran detallados en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Detalles y resultado del ensayo límite líquido.

Sondaje	PZ-2		PZ-3		PZ-2	
Prof. (cm)	15-40		40-78		85-103	
Estrato	Coluvial		Argilita alterada		Argilita inalterada	
Nº de Cops.	17	28	17	28	25	34
Nº de Tara	P52	P60	P82	P25	P24	P75
T+S+A (gr)	113.1	112.5	118.8	126.2	117.1	116.9
T+S (gr)	110.1	109.5	115.2	123.0	113.2	113.3
T (gr)	100.5	99.9	105.9	114.3	106.1	106.3
Suelo (gr)	9.6	9.6	9.3	8.6	7.2	7.0
Agua (gr)	3.0	2.9	3.5	3.2	3.9	3.6
% Humedad	31.4	30.6	38.1	37.3	54.1	51.0
%Límite líquido	30.7		37.4		53.1	

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma Española (UNE 103-103, 1994).

El límite plástico ( $\omega_P$ ) es una propiedad característica de los suelos finos, es la frontera entre el estado plástico y el semisólido (Rodríguez y Guzmán, 2005). El ensayo consistió en encontrar la humedad más baja, en donde aparecen fisuras en cilindros de 3 mm de suelo, al hacer rodar sobre una superficie lisa. Para el ensayo se requiere partículas que han pasado por el tamiz Nro. 40 (0.425 mm). Y se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103-104-93. Los resultados y detalles se encuentran en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Detalles y resultado del ensayo límite plástico.

Sondaje	PZ-2		PZ-3		PZ-2	
Prof. (cm)	15-40		40-78		85-103	
Estrato	Coluvial		Argilita alterada		Argilita inalterada	
Nº de Tara	A91	A53	B35	A64	A71	A89
T+S+A (gr)	57.6	49.0	56.1	50.7	49.5	54.8
T+S (gr)	57.2	48.6	55.6	20.2	49.0	54.3
T (gr)	54.9	46.0	53.4	47.7	46.8	52.1
Suelo (gr)	2.3	2.6	2.2	2.5	2.1	2.2
Agua (gr)	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
% Humedad	15.8	15.7	19.8	19.8	23.8	23.9
%Límite plástico	15.8		19.8		23.9	

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma Española (UNE 103-104, 1993).



El índice de plasticidad (IP) tiene un comportamiento propio de cada suelo y aporta información sobre el aumento de humedad para pasar del estado semisólido al líquido. “Con el índice de plasticidad se puede evaluar el grado de amasado que permite el suelo mientras se encuentre en su consistencia plástica” (Rodríguez y Guzmán, 2005). El índice de consistencia (IC) y el índice de fluidez (IF) dan información de la situación del suelo respecto del intervalo que limita el índice plástico y se obtiene mediante las siguientes expresiones.

$$IP = \omega_L - \omega_P \quad ; \quad IC = \frac{\omega_L - \omega}{IP} \quad ; \quad IF = \frac{\omega - \omega_P}{IP} \quad (1)$$

Donde: IP, índice de plasticidad; IC, índice de consistencia; IF, índice de fluidez;  $\omega_L$ , límite líquido;  $\omega_P$ , límite plástico y  $\omega$  es la humedad del suelo. En la

**Tabla 9** se resume los valores de cada material.

**Tabla 7:** Resumen de límites de Atterberg, índice de plasticidad, consistencia y fluidez.

Estrato	Humedad [ $\omega$ ]	Límite líquido [ $\omega_L$ ]	Límite plástico [ $\omega_P$ ]	Índice de plasticidad [IP]	Índice de consistencia [IC]	Índice de Fluidez [IF]
Coluvial	19.33	30.7	15.8	14.9	0.76	0.24
Argilita alterada	20.16	37.4	19.8	17.6	0.98	0.02
Argilita inalterada	14.63	53.1	23.9	29.2	1.32	-0.32

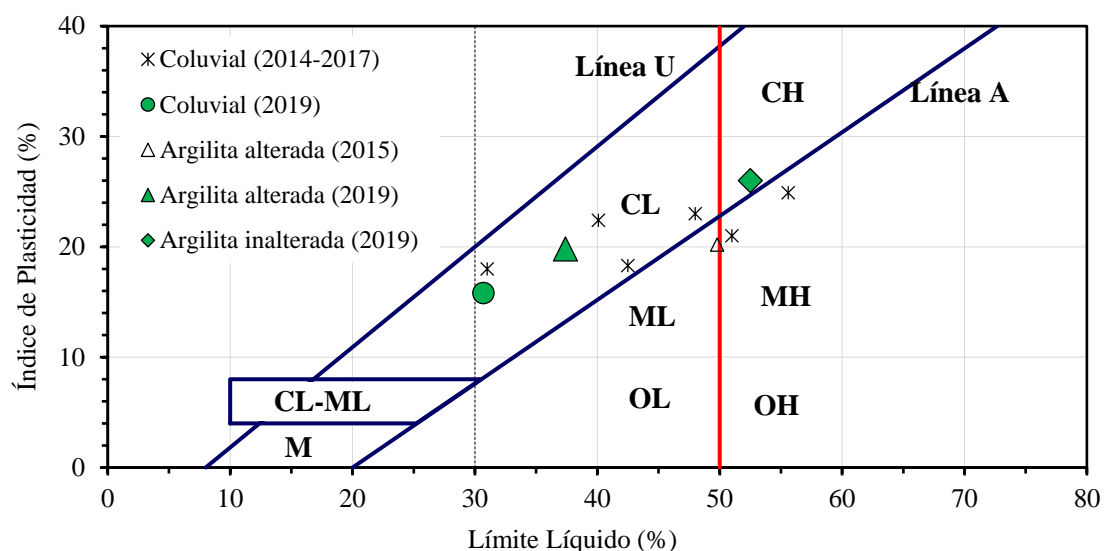
A partir de ensayos de límite de Atterberg se puede concluir que, a medida que aumenta la profundidad aumenta el  $\omega_L$ ,  $\omega_P$  e IP, es decir, las argilitas inalteradas corresponden a un suelo de alta plasticidad. También, el índice de consistencia para coluvial corresponde al estado del suelo plástico y duro; mientras, para la argilita inalterada corresponde al estado del suelo sólido.

### 3.1.3 Clasificación de suelos finos a partir de Límites de Atterberg

Los suelos de grano fino se clasifican solamente en función de límite líquido y el índice de plasticidad; para ello, se utiliza el gráfico de plasticidad de Casagrande. Para este trabajo de investigación se ha realizado tres ensayos de límites de Atterberg; y también, se ha recopilado los resultados de trabajos anteriores de Cedeño (2014), Pernía (2015) y Mosquera (2017), los cuales se detallan en la Tabla 8.

En la Figura 13 se muestra la clasificación obtenida con el gráfico de Casagrande para los tres estratos; tales como: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. Suelos provenientes de la ladera de Cercs.

Para el coluvial se tiene 7 ensayos los cuales muestran una variación desde arcilla inorgánica de baja plasticidad hasta limo de alta plasticidad; pero, en la gráfica de Casagrande se puede apreciar la mayor concentración en la zona de arcilla; en consecuencia, se ha clasificado como arcilla inorgánica (CL) de baja plasticidad. Por un lado, para el estrato de argilita alterada se clasifica arcilla inorgánica (CL) de media a alta plasticidad; mientras para la argilita inalterada se clasifica arcilla inorgánica (CH) de alta plasticidad.



**Figura 13:** Clasificación de suelos finos de acuerdo a la Carta de Casagrande.

**Tabla 8:** Resumen de ensayos de granulometría y Límites de Atterberg.

Realizado en:	Estrato	Excavación o sondeo	Prof. (cm)	Granulometría			Límites de Atterberg			SUCS
				Grava	Arena	Finos	L.L.	L.P.	I.P.	
2014*	-	-	-	-	-	-	42.5	18.3	24.3	CL
2015**	Coluvial	C (MR)	-	9.40	20.40	70.20	40.1	22.4	17.7	CL
2015**	Arg. Alterada	C (MR)	60-95	2.60	4.7	92.7	49.8	20.2	29.6	CL
2017***	Coluvial	EM-1/ORG-1	0-20	2.70	33.4	63.9	55.6	24.9	30.6	CH
2017***	Coluvial	EM-1	36	-	-	-	51.0	21.0	30.0	CH
2017***	Coluvial	EM-2	36	-	-	-	48.0	23.0	26.0	CH
2017***	Coluvial	EM-3	36	-	-	-	31.0	18.0	13.0	CL
2019	Coluvial	PZ-2	15-40	6.7	18.2	75.1	30.7	15.8	15.0	CL
2019	Arg. Alterada	PZ-3	40-78	1.2	13.5	85.3	37.4	19.8	17.6	CL
2019	Arg. Inalterada	PZ-2	85-103	2.4	12.1	85.5	53.1	23.9	29.3	CH

Nota: Arg=argilita. (\*) Ensayo realizado por Cedeño (2014). (\*\*) Ensayo realizado por Pernía (2015). (\*\*\*) Ensayo realizado por Mosquera (2017).

LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad.; CL: Arcilla inorgánica de plasticidad baja. CH: Arcilla inorgánica plasticidad alta.

## 3.2 Ensayos para estimar la conductividad hidráulica

### 3.2.1 Ensayo de infiltración

El ensayo de infiltración fue realizado in-situ en la cabecera del deslizamiento existente en Cercs; esta información se recopiló de los estudios anteriores de Cedeño (2014) y Mosquera (2017). El ensayo consistió en medir la infiltración acumulada mediante el uso de un infiltrómetro de minidisco; que consiste en una probeta graduada de 2 cm de diámetro y 20 cm de longitud. La conductividad hidráulica del suelo ha sido calculada mediante las ecuaciones de Zhang (1997) como se describe en el trabajo de Cedeño y Mosquera. Los resultados obtenidos de conductividad hidráulica se detallan en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Resumen de todos los ensayos de infiltración hasta el momento de Cercs.

Información recopilada de:	Fecha de ensayo	Descripción del sitio	Estrato	Conductividad hidráulica K [cm/s]
(Hürlimann y Moya, 2013)	15/04/2013	Aproximadamente a 100m parte arriba del deslizamiento.	Argilita alterada	2.04E-04
	15/04/2013	Aproximadamente a 100m parte arriba del deslizamiento.	Argilita alterada	1.02E-04
	30/05/2013	En 10HS-MPS-2	Coluvial	2.69E-05
	30/05/2013	En 10HS-MPS-2	Coluvial	7.03E-04
(Cedeño, 2014)	18/07/2013	Límite derecho del deslizamiento.	Coluvial	3.21E-05
	18/07/2013	Límite derecho del deslizamiento.	Coluvial	2.65E-04
	18/07/2013	Límite derecho fuera del deslizamiento.	Argilita alterada	1.59E-06
(Mosquera, 2017)	08/04/2017	Cerca de sensor 10HS y MPS-2.	Coluvial	8.85E-05
	08/04/2017	Límite izq. cerca de escarpe secundario.	Coluvial	2.28E-04

Los resultados del ensayo de infiltración para coluvial dieron conductividad hidráulica que varía en 2.28E-04 a 3.21E-05 cm/s, mientras para argilita alterada varía de 1.02E-04 a 1.59E-06 cm/s. En ambos estratos la conductividad hidráulica resultó subestimada para arcilla inorgánica (CL) de plasticidad baja para coluvial y arcilla inorgánica (CH) de plasticidad alta para argilita alterada. Según, Gonzales de Vallejo (2004) para una arcilla la conductividad hidráulica debería estar en órdenes de magnitud entre 1.0E-05 a 1.0E-08 cm/s. También, para Coduto (1999) la conductividad hidráulica para arcilla de alta plasticidad debería estar en órdenes de magnitud entre 1.0E-06 a 1.0E-10 cm/s. Los factores influyentes pueden ser varios en campo; en tal sentido, para este trabajo (TFM) se realizó ensayos de laboratorio para estimar la conductividad hidráulica.

### 3.2.2 Ensayo de permeabilidad por carga variable

Este ensayo se realizó con el fin de determinar la conductividad hidráulica, en muestras inalteradas provenientes de la zona de estudio (Cercs). Se realizó tres ensayos de carga variable en un dispositivo permeámetro en el laboratorio de GEOMAR. Cada muestra ensayada representa a un estrato; tales como: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. Los detalles se encuentran en el Anexo 2.

El ensayo consistió en colocar la muestra inalterada en un anillo cilíndrico de metal con dimensiones de 5 cm de diámetro y 2.5 cm de altura. En ambos extremos superior e inferior se colocó la piedra porosa para el drenaje y se colocó en la base del permeámetro; en seguida se conectó en la parte superior del permeámetro una bureta graduada. El equipo permeámetro y sus accesorios se muestra en la Figura 14.

Posteriormente, se llenó con agua destilada la bureta y se dejó saturar la muestra por unas 24 a 30 horas aproximadamente. La saturación ha sido lenta por tratarse de un material de baja permeabilidad. Para efectuar la lectura se añadió agua en la bureta y se registró la altura de columna de agua ( $h_1$ ) y el tiempo de inicio ( $t_1$ ), pasado cierto tiempo unos 300 minutos se volvió a registrar la columna de agua en la bureta ( $h_2$ ) y el tiempo final ( $t_2$ ).



**Figura 14:** Permeámetro y sus accesorios. (1) Bureta, (2) anillo metálico, (3) base del permeámetro, (4) válvula de conexión bureta y la probeta, (5) anillo metálico para la probeta, (6) piedras porosas, (7) anillo para fijar la probeta en la base del permeámetro y (8) válvulas de fijación.

Para determinar la conductividad hidráulica se partió de la ley de conservación de la masa, que consiste en volumen de agua que ingresa a la muestra será igual al volumen de agua que sale de la muestra. El caudal que atraviesa por la muestra será definido por la ley de Darcy. A continuación, se detalla la deducción para calcular la conductividad hidráulica.

Partimos de una ecuación más simple, que el caudal que entra a la muestra es igual al caudal que sale de la muestra.

$$q_{int} = q_{out} \quad (*)$$

El caudal que entra ( $q_{int}$ ) está en función del área de la bureta ( $a$ ) y la velocidad ( $v$ ) de descenso de agua en la bureta en cada instante de tiempo. Entonces la velocidad estará en función a la derivada de altura ( $dh$ ) respecto a la derivada de tiempo ( $dt$ ), se expresa de la siguiente manera:

$$q_{int} = a * v = -a \frac{dh}{dt}$$

Por un lado, tenemos el caudal agua que atraviesa la muestra de suelo  $q_{out}$ . Mediante la ley de Darcy se expresa de la siguiente manera.

$$q_{out} = q = Aki = Ak \frac{h}{L}$$

Reemplazamos  $q_{int}$  y  $q_{out}$  en la ecuación (\*) y luego integramos desde un  $t_1$  hasta  $t_2$ ; para la altura piezométrica de  $h_1$  hasta  $h_2$ .

$$-\frac{dh}{h} = \frac{A * k}{a * L} dt$$

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{A * k}{a * L} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Finalmente, se obtiene la ecuación para calcular la conductividad hidráulica.

$$K = \frac{a * L}{A(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2)$$

Donde: K es conductividad hidráulica del suelo expresado en cm/s; a, es el área de la sección transversal de la bureta; L, la longitud de la muestra; A es el área de la sección transversal de la muestra de suelo;  $h_1$  es el nivel inicial del agua en la bureta al empezar el ensayo;  $h_2$  es el nivel final del agua en la bureta al finalizar el ensayo;  $t_1$  es el tiempo inicial del ensayo y  $t_2$  es el tiempo final del ensayo.

En la Tabla 10 se muestra los detalles y resultados de conductividad hidráulica para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada.

**Tabla 10:** Detalle y resultado del ensayo de permeabilidad por carga variable.

	<b>Sondaje</b>	PZ-2	PZ-2	PZ-3	<b>Variables</b>
	<b>Profundidad (cm)</b>	31-35	55-59	90-94	
	<b>Estrato</b>	Coluvial	Argilita Alterada	Argilita Inalterada	
<b>Dimensiones de la Bureta</b>	Diámetro (cm)	0.70	0.70	0.70	[d]
	Área sección (cm <sup>2</sup> )	0.38	0.38	0.38	[a]
<b>Dimensiones de la probeta del suelo</b>	Diámetro (cm)	5.04	5.04	5.04	[D]
	Altura (cm)	2.48	2.48	2.48	[L]
	Sección (cm <sup>2</sup> )	19.95	19.95	19.95	[A]
	Volumen (cm <sup>3</sup> )	49.48	49.48	49.48	[V]
<b>Ensayo de permeabilidad</b>	Tiempo inicial (hs)	10:04:00	8:24:00	10:51:00	[t <sub>1</sub> ]
	Tiempo final (hs)	16:28:00	14:48:00	15:20:00	[t <sub>2</sub> ]
	Intervalo de tiempo	21840.00	23040.00	16140.00	[t]
	Carga inicial (cm)	31.71	32.45	32.45	[h <sub>1</sub> ]
	Carga final (cm)	28.50	31.71	31.47	[h <sub>2</sub> ]
Conductividad hidráulica (cm/seg)		2.34E-07	4.80E-08	9.16E-08	[K]

### 3.2.3 Conductividad hidráulica a partir del edómetro (corte-directo)

Previo al ensayo de corte directo se realizó la etapa de consolidación, que consistió en aplicar un incremento de carga vertical a la probeta del suelo saturado y doblemente drenado superior e inferior. Durante esta etapa se midió los asientos verticales en función del tiempo. El tiempo de consolidación en cada probeta fue de 24 a 30 horas.

Para estimar la conductividad hidráulica a partir de asientos, primero se determinó el coeficiente de consolidación por el método de Casagrande; que consiste en encontrar el tiempo de consolidación primaria al 50% a partir del gráfico asiento vs tiempo a escala logarítmica (ver Figura 20 al 22), que corresponden al estrato coluvial, argilita alterada y argilita inalterada.

Para el cálculo de coeficiente de consolidación ( $C_v$ ), se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{T * H^2}{t_{50}} \quad (3)$$

Donde: T representa factor tiempo adimensional, que depende del grado de consolidación de la muestra al 50% ( $T=0.197$ ). H es la distancia máxima de drenaje en 50% de consolidación primaria; cuando es doblemente drenada el valor de H es la mitad de la altura de la probeta en el instante  $t_{50}$ .

Para obtener el módulo edométrico se ha utilizado la relación entre el incremento de carga y la deformación vertical. Y la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon_z} \quad (4)$$

Donde:  $\Delta\sigma'$  incremento de carga;  $\Delta\varepsilon_z$  incremento de deformación vertical medido durante la etapa de consolidación.

Para obtener la conductividad hidráulica se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$K = \frac{C_v * \gamma_w}{E_m} \quad (5)$$

En la Tabla 11 se muestra los resultados de conductividad hidráulica, estimados a partir del edómetro (corte-directo) para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. Los resultados son muy parecidos al ensayo de permeabilidad por carga variable.

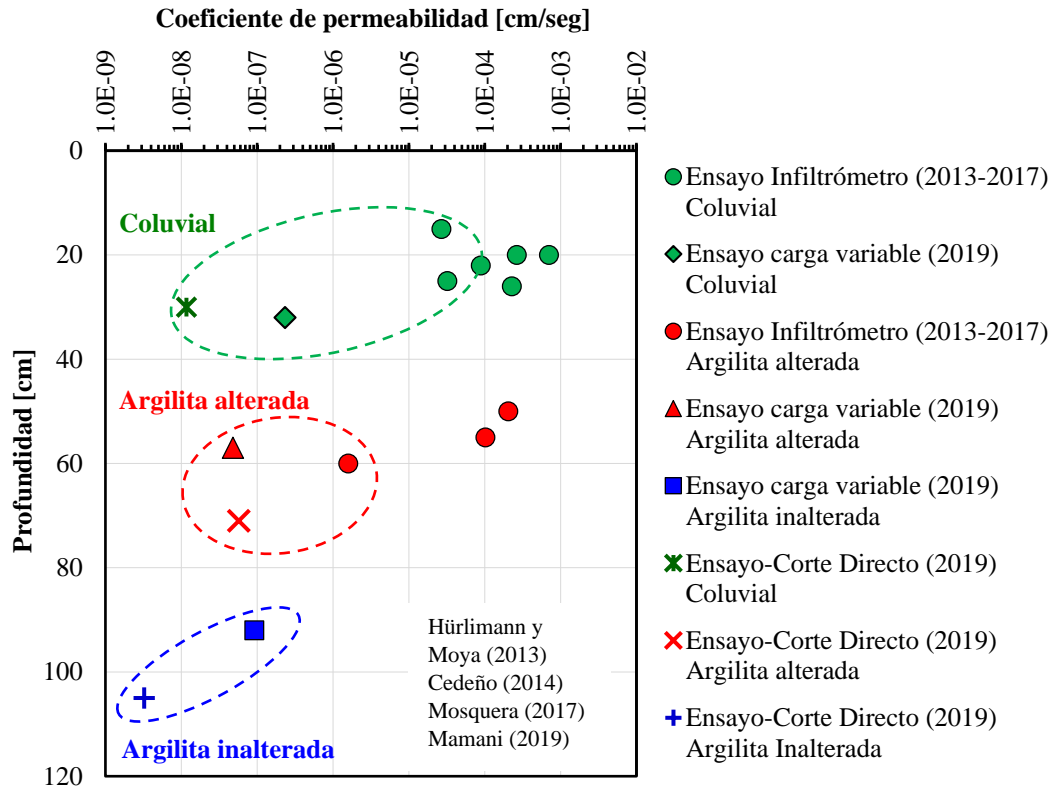
**Tabla 11:** Estimación de conductividad hidráulica a partir de la consolidación (Corte-Directo).

Estrato	2H (cm)	$t_{50}$ (seg)	T	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)	$E_m$ (kN/m <sup>2</sup> )	K (m/seg)	K (cm/seg)
Coluvial	1.250	1000	0.197	3.08E-08	2634.66	1.17E-10	1.17E-08
Arg. Alterada	1.250	240	0.197	1.28E-07	2239.72	5.73E-10	5.73E-08
Arg. Inalterada	1.250	3000	0.197	1.03E-08	3155.49	3.25E-11	3.25E-09

En la Figura 15, se puede apreciar los resultados de ensayo de infiltrómetro, ensayo de permeabilidad por carga variable y la estimación de conductividad hidráulica mediante edómetro (corte-directo). La conductividad hidráulica de cada estrato varía en órdenes de magnitud máximo de 1.0E-03 cm/seg; en consecuencia, se puede deducir que los ensayos de campo pueden estar sujetos a algunos errores.

Por lo tanto, para obtener la conductividad hidráulica más representativa para cada estrato se realizó la media entre resultados de laboratorio y los resultados del infiltrómetro (in-situ). Para los resultados del infiltrómetro solo se consideró los valores de 1.0E-05 y 1.0E-06 cm/seg; en otras palabras, solo se consideró los valores de conductividad hidráulica que se encuentran en rango 1.0E-05 a 1.0E-09 según Gonzales de Vallejo (2004) y Coduto (1999).

La conductividad hidráulica más representativa para coluvial es de 2.91E-06 cm/seg, para argilita alterada 5.65E-07 cm/seg y para argilita inalterada 4.74E-08 cm/seg.



**Figura 15:** Conductividad hidráulica respecto a la profundidad.

### 3.2.4 Estimación de permeabilidad intrínseca

La conductividad hidráulica no es un parámetro intrínseco que representa la característica del suelo o medio poroso, pues también depende del fluido como la viscosidad y peso específico del mismo (Sánchez, 2011). Con la ecuación-6 se calcula la permeabilidad intrínseca.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (6)$$

Donde:

$K$  es la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (m/seg),

$k$  es la permeabilidad intrínseca ( $m^2$ ),

$\rho$  es la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ) y  $g$  es la aceleración de gravedad  $9.806 m/s^2$ ,

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido. Para agua a  $20^\circ C$  considerar  $0.001 Pa.s$ .

Para obtener el parámetro de permeabilidad intrínseca, se ha usado la ecuación 6, despejando la variable ( $k$ ). Los resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca se encuentran resumidos en la Tabla 12 para tres materiales (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada).

**Tabla 12:** Conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca de las capas.

Estrato	Conductividad hidráulica K (cm/seg)	Conductividad hidráulica K (m/seg)	Permeabilidad intrínseca k ( $m^2$ )
Coluvial	2.91E-06	2.91E-08	2.97E-15
Argilita alterada	5.65E-07	5.65E-09	5.76E-16
Argilita inalterada	4.74E-08	4.74E-10	9.34E-17

Nota:  $\rho g = 9806 N/m^3$ ,  $\mu = 0.001 Pa.s$ .

La variación de permeabilidad intrínseca en función de la porosidad, para un medio continuo a partir del modelo propuesto por Kozeny, se expresa de la siguiente manera:

$$k = k_0 \left[ \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2} \right] \left[ \frac{(1 - \varphi_0)^2}{\varphi_0^3} \right] \quad (7)$$

Donde:  $k$  es permeabilidad intrínseca,  $\varphi$  es la porosidad,  $\varphi_0$  es la porosidad de referencia (coluvial,  $\varphi_0=0.373$ ; argilita alterada  $\varphi_0=0.356$ ; argilita inalterada  $\varphi_0=0.322$ ),  $k_0$  es la permeabilidad intrínseca media con  $\varphi_0$ .

Además, la ecuación-7, utiliza la ley del flujo de Darcy que se expresa de la siguiente manera:

$$q_\alpha = -\frac{k k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha g) \quad (8)$$

Donde:  $k$  es permeabilidad intrínseca,  $k_{r\alpha}$  es la permeabilidad relativa de la fase líquida,  $\mu_\alpha$  es la viscosidad dinámica de la fase líquida,  $\nabla P_\alpha$  es el gradiente de presiones de la fase líquida,  $\rho_\alpha$  es la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  es la aceleración de gravedad  $9.806 \text{ m/s}^2$ .

### 3.2.5 Permeabilidad relativa

La permeabilidad relativa se puede obtener de varias maneras, una de ellas es mediante el cociente entre la permeabilidad intrínseca no saturada y la permeabilidad intrínseca saturada, la ecuación se expresa de la siguiente manera.

$$k_r = \frac{k_{no\_saturado}}{k_{saturado}} \quad (9)$$

También, la permeabilidad relativa se puede obtener a partir del modelo de Van Genuchten (1980), este modelo calcula en función de grado de saturación efectiva y función de forma, de la curva de retención. El código de Code\_Bright usa este modelo para calcular la permeabilidad relativa.

$$k_r = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad (10)$$

Donde:  $S_e$  es grado de saturación efectiva,  $\lambda$  función de forma del modelo de Van Genuchten.

Existe otra expresión para calcular la permeabilidad relativa conocida como “modelo de potencia generalizado”. Esta expresión está en función de grado de saturación efectiva y función de forma.

$$k_r = A S_e^\lambda \quad (11)$$

Donde:  $A$  es un constante, típicamente se considera 1;  $S_e$  es grado de saturación efectiva,  $\lambda$  es un parámetro que se emplea en la ley cúbica típicamente se considera 3.



### 3.3 Ensayo de corte directo

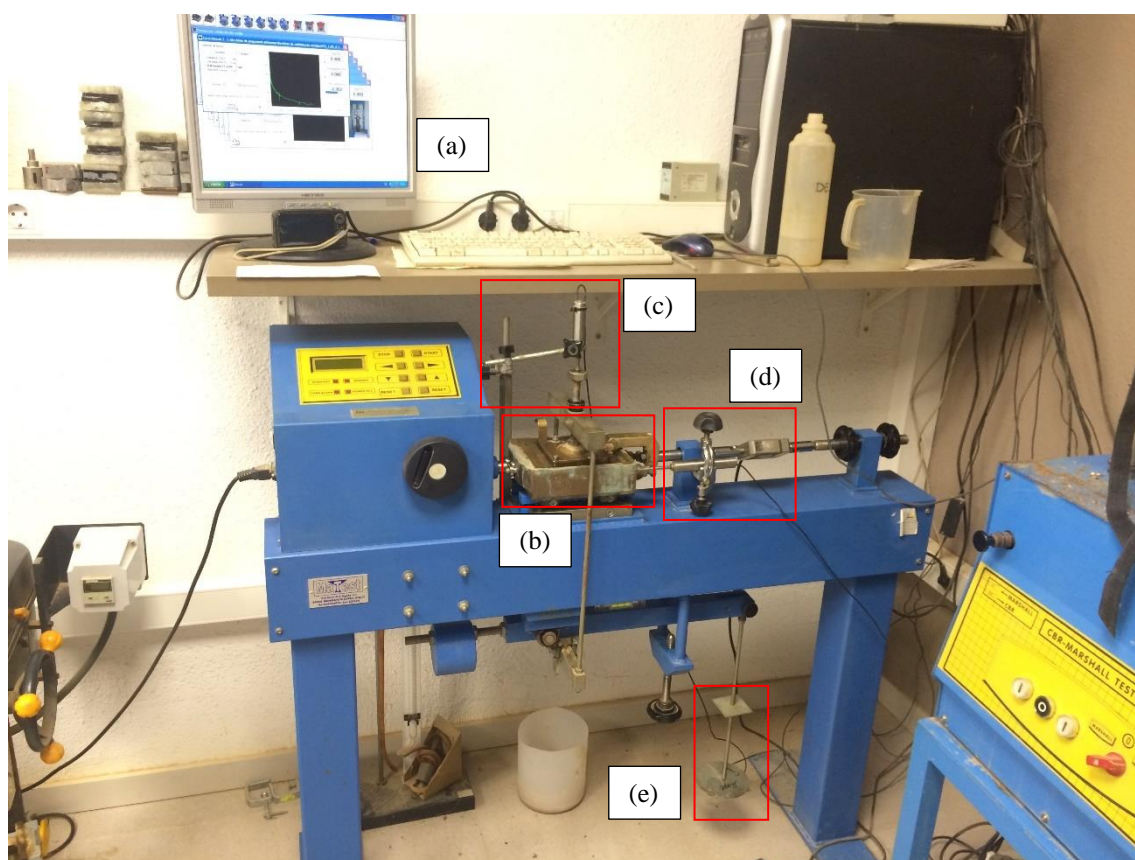
El ensayo de corte directo se realizó en condición consolidado-drenado (CD); es decir, que durante el proceso de consolidación se inundó con agua la caja de corte. Por tratarse de suelos finos y cohesivos, la etapa de consolidación duró entre 24 a 32 horas. En seguida, se aplicó una fuerza tangencial (horizontal) a una velocidad de 0.02 mm/min, desplazamiento horizontal máxima de 10mm.

El objetivo del ensayo fue para determinar los parámetros resistentes como: la cohesión ( $c$ ) y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) en tres muestras provenientes del deslizamiento existente de Cercs (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada). Estos, parámetros contribuirán para el análisis de estabilidad mediante el equilibrio límite en software Slide 8.0 de Rocscience.

#### 3.3.1 Descripción del equipo

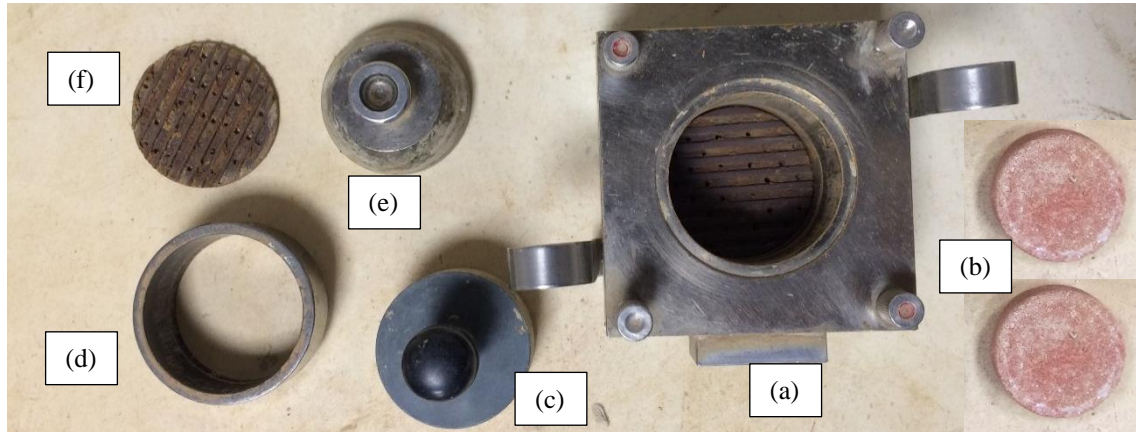
Para el ensayo de corte directo se ha utilizado el equipo Mecánica Científica Ref. 21.0400. Este equipo cuenta con transductores LVDT Solartron BS5 y BS10 para medir el desplazamiento vertical y horizontal. También, cuenta con una célula AEP TS 0.5t para aplicar la tensión de corte.

El equipo de corte directo tiene las siguientes partes: Un ordenador para la adquisición de datos y control del ensayo (Figura 16a). Transductor LVDT Solartron BS5 de precisión 0.001mm para medir el desplazamiento vertical durante el ensayo (Figura 16c). Transductor LVDT Solartron BS10 de precisión 0.001mm para medir el desplazamiento horizontal con un recorrido máximo de 10mm (Figura 16b). Un yugo para la aplicación de carga (Figura 16e). Pistón de carga para transmitir carga vertical a la probeta (Figura 16b).



**Figura 16:** Equipo de corte directo. (a) Ordenador para registrar datos. (b) Pistón de carga. (c) y (d) Medidor de desplazamiento vertical y horizontal. (e) Yugo de aplicación de cargas.

En la Figura 17 se muestra los accesorios para ensamblar la probeta de suelo en caja de corte, los cuales están conformados por: caja de corte en forma cuadrada de dimensiones 4x4" (Figura 17a) compuesta de dos piezas que se dividen en dos mitades horizontales; un anillo metálico de 5 mm de diámetro donde se coloca la muestra (Figura 17d); dos piedras porosas colocadas por encima y debajo de la probeta (Figura 17b) que permite el drenaje. Y una placa de transferencia de carga (Figura 17e) que se coloca en la parte superior de caja de corte, su función es transmitir un esfuerzo normal a la probeta.

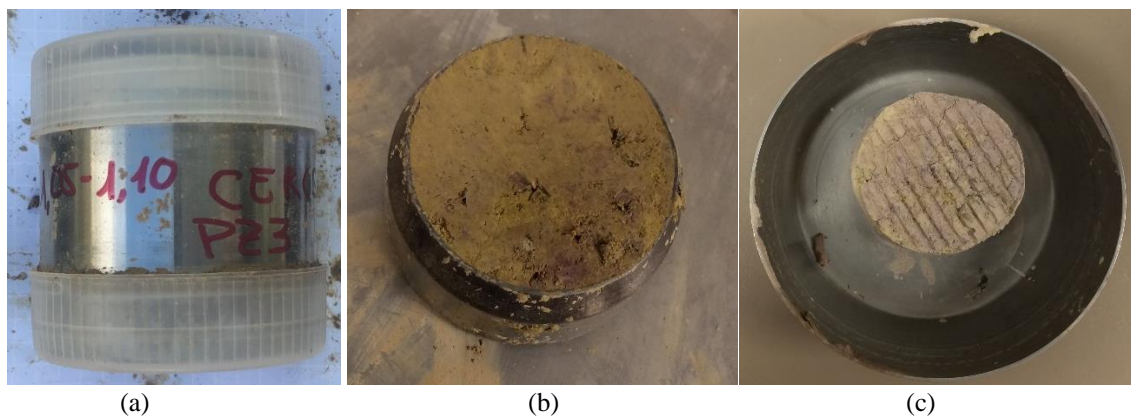


**Figura 17:** Accesorios de equipo de corte. (a) Caja de corte. (b) Piedras porosas. (c) Extractor de muestra. (d) Muestreador. (e) Placa de transferencia de carga. (f) Placa ranurada.

### 3.3.2 Preparación de la muestra

Las muestras de coluvial y argilita inalterada, se han extraído de sondeos con sumo cuidado y han sido transferidas a un porta muestras (Figura 18a). Estas muestras inalteradas en el laboratorio han sido transferidas directamente al anillo de corte, tallando la parte superior e inferior para que quede al mismo nivel del anillo (Figura 18b).

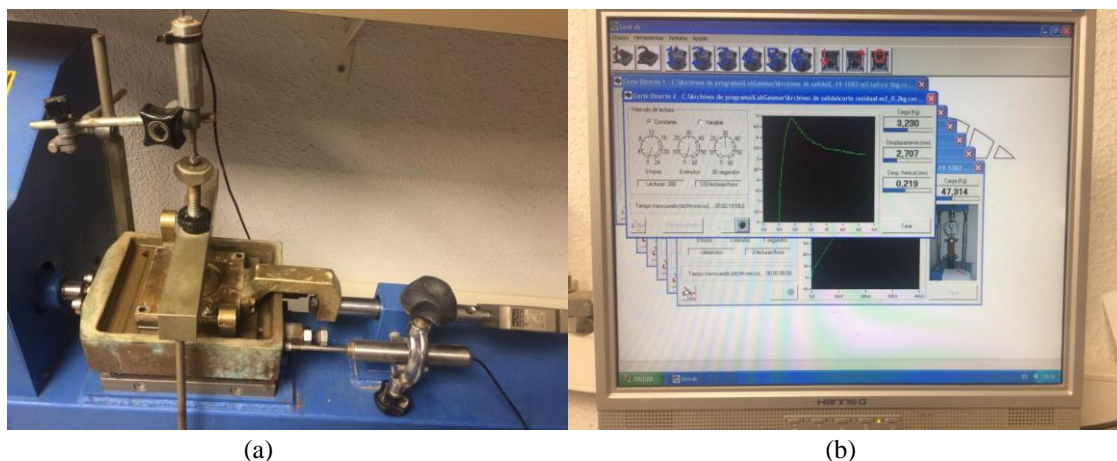
Sin embargo, la muestra que corresponde al estrato de argilita alterada, no ha sido posible extraer una muestra inalterada, por ello, en el laboratorio se realizó el proceso de remoldeo, asumiendo la humedad y la densidad del suelo muy similar a argilita inalterada.



**Figura 18:** (a) Muestra obtenida en campo. (b) Muestra en el anillo de corte. (c) Muestra después del ensayo de corte directo.

### 3.3.3 Procedimiento de ensayo

**Primera etapa-ajustes en el equipo.** – Una vez ensamblada perfectamente la caja de corte (placa ranurada, piedras porosas en ambos extremos y el pistón de carga); se ha introducido en una caja exterior de mayor tamaño que se encuentra sobre la bancada rígida del equipo de corte directo y luego se procedió a los ajustes en el medidor de fuerza horizontal. También, se realizó los ajustes del sistema de aplicación de fuerza vertical (Figura 19a) y centrar para lograr su verticalidad. En seguida poner en lectura cero a los transductores desde un ordenador (Figura 19b).



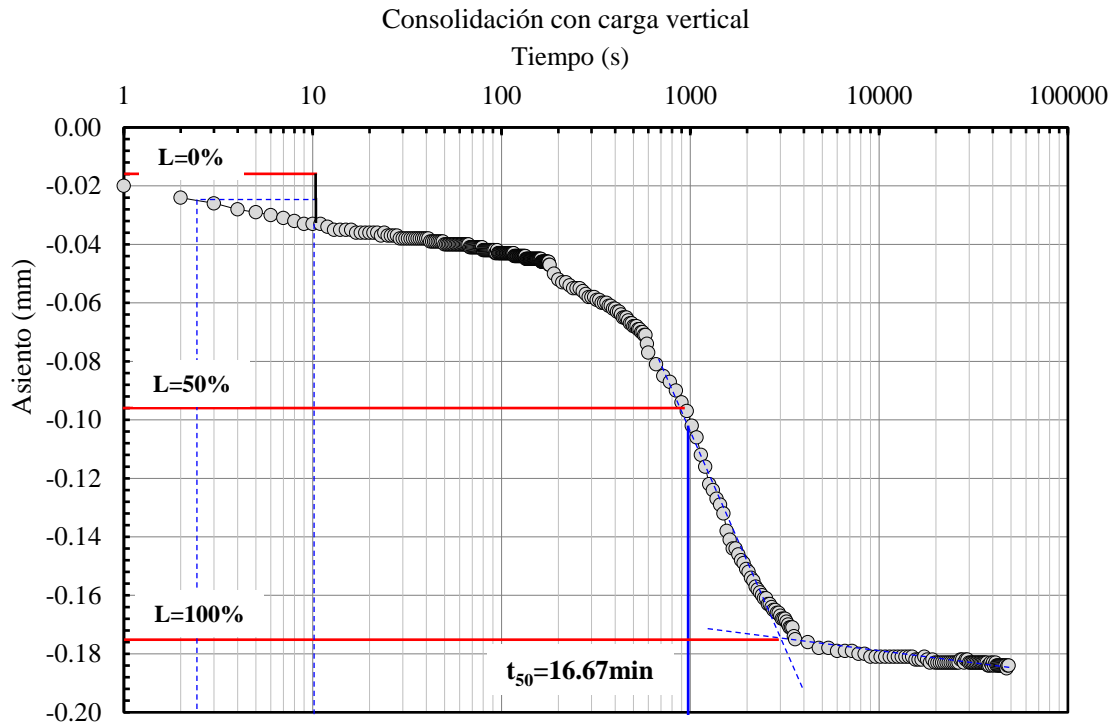
**Figura 19:** (a) Armado de la caja de corte. (b) Adquisición mediante un ordenador.

**Segunda etapa-consolidación.** – Una vez finalizado los ajustes, se colocó de forma rápida y suave la pesa en el colgadero del yugo. El peso utilizado para cada probeta fue de 0.2 kp, 0.4 kp y 0.8 kp. Lo cual permite asimilar las tensiones in situ. Después de poner la pesa se llenó con agua destilada de forma rápida hasta el nivel superior de la probeta y se mantuvo durante todo el ensayo. La etapa de consolidación para cada probeta fue más de 24 horas hasta completar la consolidación primaria.

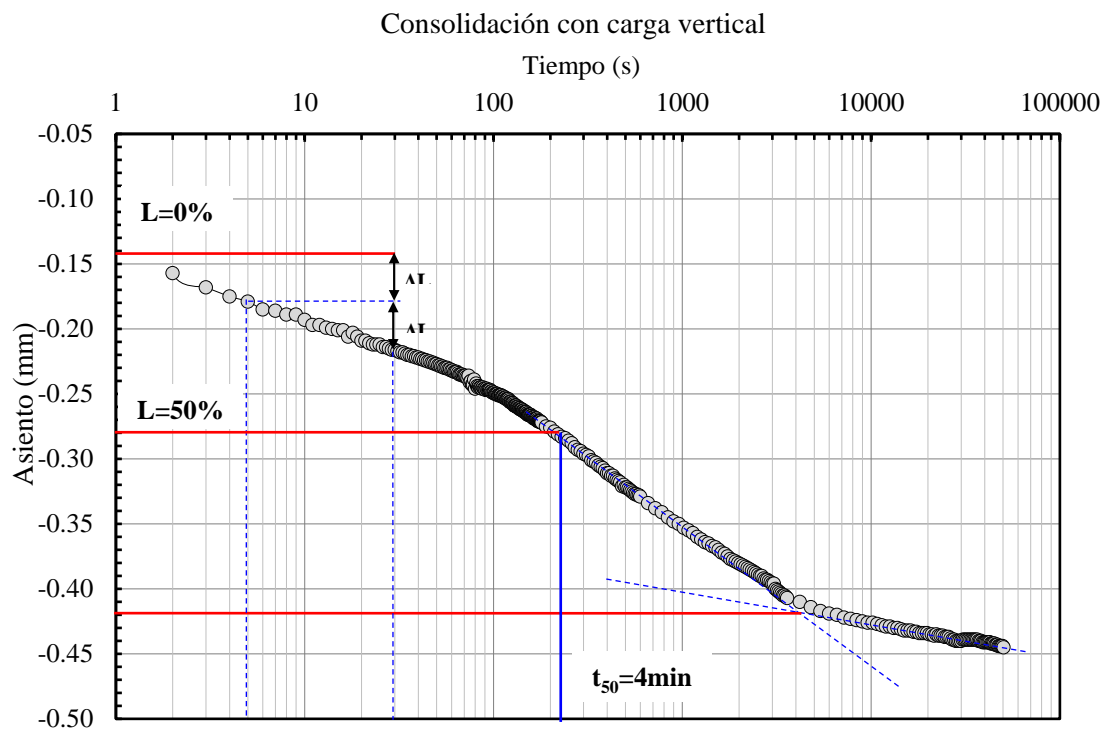
**Tercera etapa-Corte y corte residual.** – El cual consistió en aplicar la fuerza horizontal a una velocidad de 0.02 mm/min hasta desplazar 10mm, en 8 horas y 30 minutos. Posteriormente se realizó el corte residual en cinco ciclos de ida y vuelta, en el último ciclo se registró los datos para estimar los parámetros de cohesión y el ángulo de rozamiento interno residual.

### 3.3.4 Resultados de la etapa de consolidación del ensayo de corte directo

La etapa de consolidación tiene tres objetivos principales para este trabajo. 1) Mediante la aplicación de carga vertical se aproximan las tensiones que estaban sometidas antes de extraer la muestra. 2) La curva de consolidación primaria permite calcular el tiempo de corte y la velocidad máxima. 3) A partir de asiento vs tiempo (curva de consolidación) se determinó la conductividad hidráulica (ver en el ítem 3.2.3). En la Figura 20 al 22 se muestra la curva de consolidación para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada respectivamente.

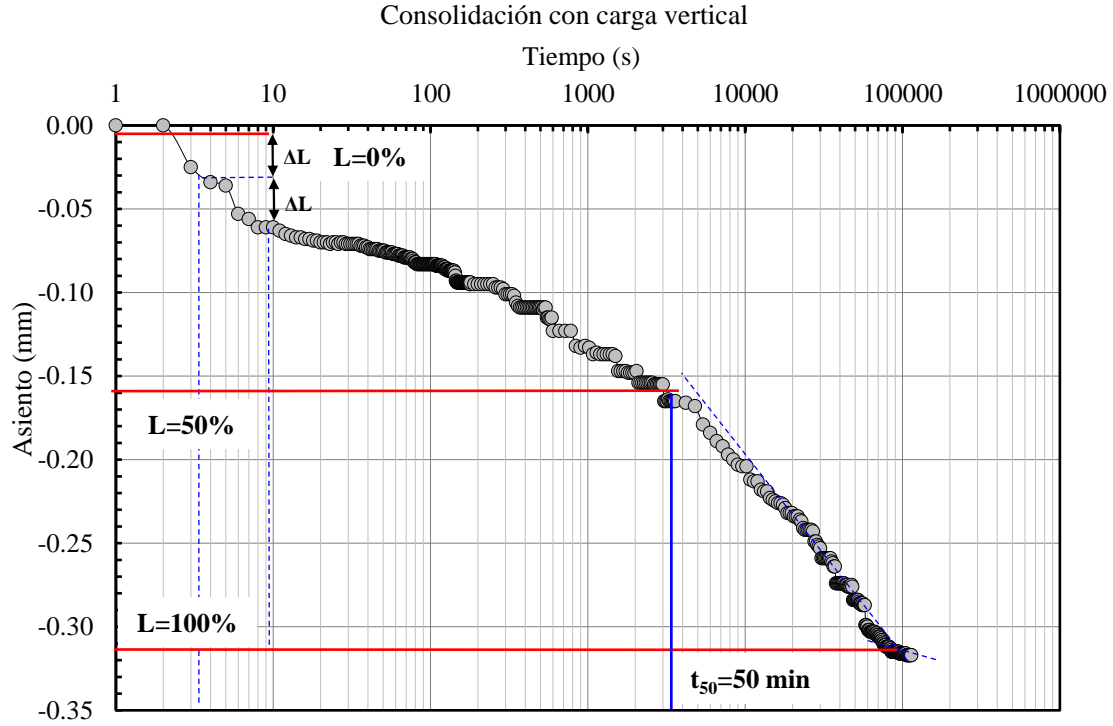


**Figura 20:** Etapa de consolidación para coluvial sometido a una carga vertical de  $20 \text{ kN/m}^2$ .



**Figura 21:** Etapa de consolidación para argilita alterada sometida a una carga vertical de  $40 \text{ kN/m}^2$ .





**Figura 22:** Etapa de consolidación para argilita inalterada sometida a una carga vertical de 40 kN/m².

#### ***Determinación de la velocidad de corte durante el ensayo.***

Para determinar la velocidad de corte se ha seguido la metodología de Casagrande. El cual consiste en hacer un gráfico entre la deformación vertical en ordenadas vs el tiempo expresado a escala logarítmica en abscisas. A partir de este gráfico se ha obtenido el tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria,  $t_{50}$ . Como se aprecia en las figuras 20, 21 y 22, que corresponden a los tres materiales.

Primero es necesario calcular el coeficiente de consolidación,  $C_v$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{T * H^2}{t_{50}} \quad (12)$$

Donde: T representa tiempo adimensional que depende del grado de consolidación de la muestra a 50% ( $T=0.197$ ). H es la distancia máxima de drenaje en 50% de consolidación primaria, es decir, la mitad de la altura de la probeta en el instante  $t_{50}$ .

Con la siguiente ecuación se calcula el tiempo necesario para alcanzar la máxima resistencia al corte ( $t_f$ ).

$$t_f = \frac{H^2}{2C_v(1 - U_f)} \quad (13)$$

Donde:  $U_f$  es el grado de disipación de presiones intersticiales. Para este ensayo se consideró el valor 0.95, este valor es más usual y recomendado por la norma UNE-103-401-1998.

Para determinar la velocidad máxima de desplazamiento horizontal,  $V_{max}$ , expresado en mm/min, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f} \quad (14)$$

Donde:  $d_f$  es el desplazamiento horizontal estimado, cuando se alcanza la resistencia de corte máximo. En la siguiente tabla se detalla los valores típicos recomendados por la norma UNE 103-401-1998.

**Tabla 13:** Desplazamiento de la caja en función del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Desplazamiento en la caja para alcanzar la máxima resistencia (mm)
Arena floja	5 a 8
Arena compacta	2 a 5
Arcilla plástica	8
Arcilla dura	2 a 5
Arcilla muy dura	1 a 2

Fuente: Norma Española (UNE 103-401, 1998).

La velocidad máxima de corte,  $V_{max}$ , se determinó con la ecuación 14. Para ello, se ha asumido el grado de disipación de presión de poro  $U_f$  0.9. También, para el desplazamiento horizontal máximo se ha asumido  $d_f$  de 8 mm para una arcilla plástica. En la Tabla 14 se muestra la velocidad de corte para los tres materiales.

**Tabla 14:** Estimación de la velocidad máxima de corte.

Variables	Coluvial	Arg. Alterada	Arg. Inalterada	Unidades
H	0.0125	0.0125	0.0125	m
Cv	3.07813E-08	1.28255E-07	1.02604E-08	m <sup>2</sup> /seg
$U_f$	0.9	0.9	0.9	-
$d_f$	8	8	8	mm
$t_f$	25380.71	12182.74	76142.13	seg
$V_{max}$	0.02	0.04	0.01	mm/min

La velocidad de corte obtenido a partir de la curva de consolidación resulta desde 0.01 a 0.04 mm/min, lo cual nos indica que a velocidades menores de 0.04 mm/min no se producirá las presiones intersticiales.

El objetivo para calcular la velocidad máxima de corte, a partir de la curva de consolidación fue para corroborar la velocidad de corte 0.02 mm/min asumida al inicio del ensayo.

### 3.3.5 Resultado de parámetros físicos y resistentes del ensayo de corte directo

#### *Ecuaciones empleadas para obtener los parámetros físicos y resistentes*

Aquí se describe de manera breve las ecuaciones para determinar los parámetros físicos y resistentes de las probetas ensayadas con el equipo de corte directo. Para ello, se ha tomado en cuenta la normativa UNE-103-401-1998.

**Humedad inicial ( $\omega_i$ ).** – Se calcula antes de someter al ensayo y se expresa en %. Y se determina mediante la siguiente expresión:

$$\omega_i = \frac{W_{hi} - W_{di}}{W_{di}} \times 100 \quad (15)$$

Donde:  $\omega_i$  es la humedad inicial,  $W_{hi}$  peso húmedo del suelo y  $W_{di}$  peso seco del suelo.

**Densidad aparente ( $\rho$ ).** – También conocida como la densidad húmeda del suelo normalmente se expresa en g/cm<sup>3</sup> y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{W_{hi}}{A * h} \times 100 \quad (16)$$

Donde:  $W_{hi}$  es el peso húmedo del suelo, A es el área inicial de la probeta, h es la altura inicial de la probeta, en mm.

**Densidad seca ( $\rho_d$ ).** – Se expresa en g/cm<sup>3</sup> y se determina mediante la siguiente expresión:

$$\rho_d = \frac{W_{di}}{A * h} \times 100 \quad (17)$$

**Índice de poros inicial ( $e_i$ ).** – Es un valor adimensional y se obtiene de la siguiente expresión:

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (18)$$

Donde:  $\rho_s$  es la densidad de sólidos de las partículas, en gr/cm<sup>3</sup>. En esta tesis se ha considerado 2.70 g/cm<sup>3</sup>.

**Grado de saturación inicial ( $S_i$ ).** – Se expresa en % y se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S_i = \frac{\omega_i * \rho_s}{e_i} \quad (19)$$

Donde:  $\omega_i$  es la humedad inicial.

**Índice de poros final ( $e_f$ ).** – Es un valor adimensional y se obtiene al final del ensayo. Para ello, se utiliza la siguiente expresión en función de índice de poros inicial, variación de la altura de probeta y altura inicial.

$$e_f = e_i - \frac{\Delta h}{h} (1 - e_i) \quad (20)$$

Donde:  $\Delta h$  es el cambio de altura que ha sufrido la probeta, en el momento considerado, expresado en mm.

### **Tensión tangencial o tensión de corte**

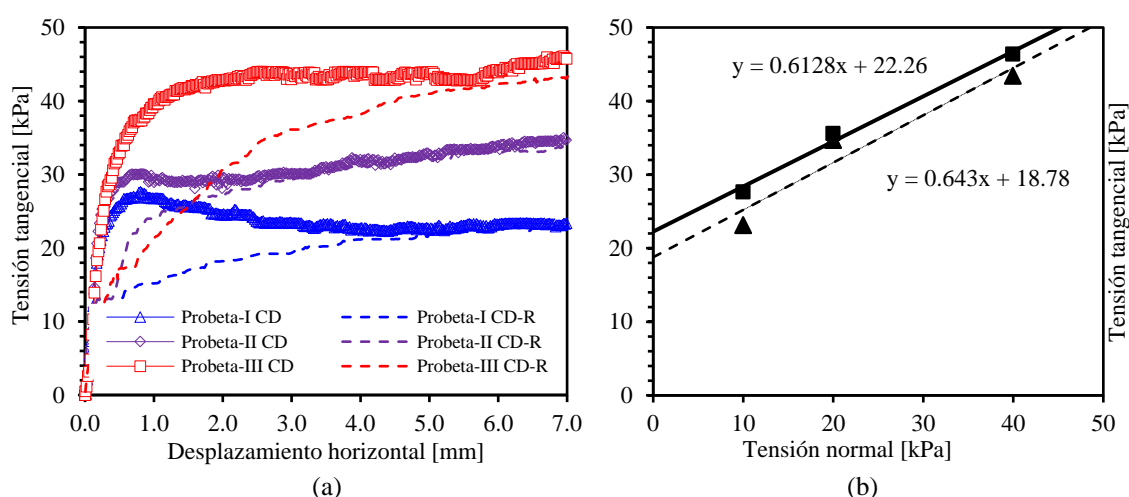
La tensión de corte se obtiene a partir de una relación entre; la fuerza tangencial aplicada a la probeta ( $F_h$ ) en Newton o kp/cm<sup>2</sup> y el área inicial de la probeta en mm<sup>2</sup>. La fuerza tangencial es medida con el transductor LVDT durante el ensayo. Por lo expuesto, la tensión tangencial se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F_h}{A} \quad (21)$$

En la Tabla 15 al 17 se detallan las condiciones del ensayo, resultados de las propiedades físicas (contenido de humedad, densidad, índice de poros) al inicio y final del ensayo, tensiones aplicadas a la probeta; y resultados de los parámetros resistentes (cohesión y el ángulo de rozamiento interno) para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada.

**Tabla 15:** Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para coluvial.

Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte[mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en plato del equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de la probeta inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	18.43	18.27	21.27
Contenido de humedad final [%]	22.25	22.42	22.31
Densidad húmeda [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.02	2.02	2.02
Densidad seca [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.71	1.71	1.67
Índice de poros inicial	0.582	0.582	0.621
Índice de poros final	0.581	0.57	0.583
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión tangencial máxima [kPa]	26.8	32.9	43.7
Tensión tangencial residual [kPa]	22.8	32.1	40.4
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]	22.26		
Cohesión residual [kPa]	18.78		
Ángulo de fricción interna pico [°]	32		
Ángulo de fricción interna residual [°]	32		

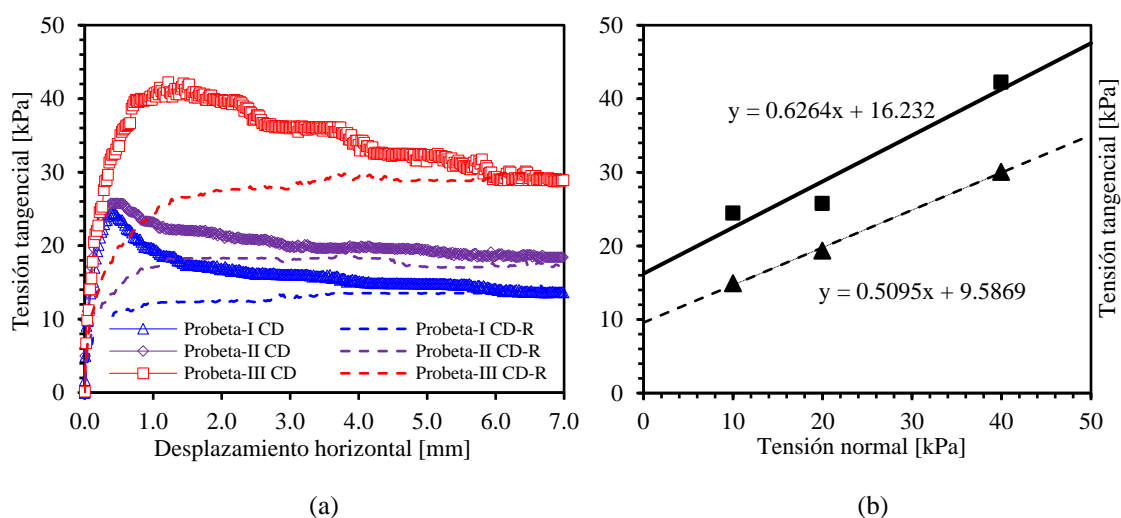


**Figura 23:** (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de coluvial. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$  y  $\phi'$ ) del ensayo corte directo.



**Tabla 16:** Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para argilita alterada.

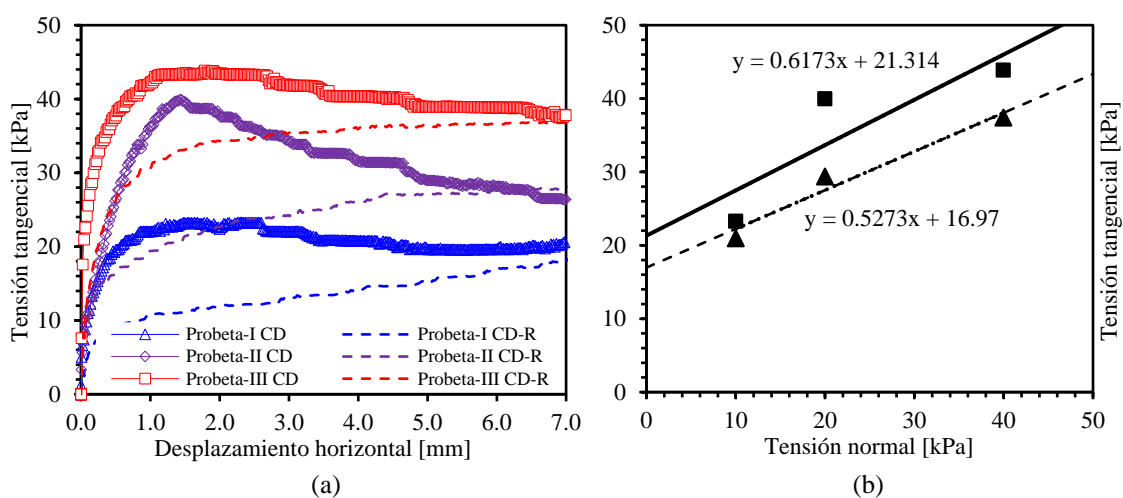
Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte[mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en plato del equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de la probeta inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	17.83	19.9	20.16
Contenido de humedad final [%]	22.31	23.51	21.8
Densidad húmeda [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.07	2.06	2.07
Densidad seca [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.75	1.72	1.72
Índice de poros inicial	0.544	0.573	0.541
Índice de poros final	0.25	0.263	0.431
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión de corte máxima [kPa]	24.5	25.8	42.3
Tensión de corte residual [kPa]	14.9	19.4	30.1
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]	16.2		
Cohesión residual [kPa]	9.6		
Ángulo de fricción interna pico [°]	32		
Ángulo de fricción interna residual [°]	27		



**Figura 24:** (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de argilita alterada. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$  y  $\phi'$ ) del ensayo corte directo.

**Tabla 17:** Detalles y resultados del ensayo de corte directo-consolidado drenado para argilita inalterada

Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte[mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en plato del equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de la probeta inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	14.57	13.87	15.45
Contenido de humedad final [%]	19.09	17.14	17.03
Densidad húmeda inicial [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.08	2.08	2.08
Densidad húmeda final [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.82	1.82	1.8
Índice de poros inicial	0.448	0.48	0.5
Índice de poros final	0.483	0.475	0.481
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión tangencial máxima [kPa]	23.3	40.0	43.9
Tensión tangencial residual [kPa]	21.0	29.4	37.4
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]		21.3	
Cohesión residual [kPa]		16.9	
Ángulo de fricción interna pico [°]		32	
Ángulo de fricción interna residual [°]		28	



**Figura 25:** (a) Tensión tangencial vs desplazamiento horizontal para tres probetas de argilita inalterada. (b) Envoltentes de rotura y los parámetros de resistencia al corte ( $c'$  y  $\phi'$ ) del ensayo corte directo.

### 3.3.6 Análisis de resultados del ensayo de corte directo

En este ítem se analiza los resultados obtenidos del ensayo de corte directo bajo dos parámetros resistentes como la cohesión y el ángulo de rozamiento interno o ángulo de fricción. La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre partículas del suelo, este parámetro representa la resistencia al corte. Mientras, el ángulo de fricción depende de varios factores como: el tamaño de granos, forma de granos, distribución de tamaño de granos y la densidad (Bilz, 1995).

El ensayo se realizó para caracterizar los parámetros resistentes de coluvial, argilita alterada y argilita inalterada, las dos primeras capas corresponden a una arcilla inorgánica de baja plasticidad y la capa de argilita inalterada corresponde a una arcilla inorgánica de alta plasticidad; el ensayo se realizó en condición: consolidado-drenado (CD), con tres escalones de carga 2, 4 y 8 kg (teniendo en cuenta el brazo mecánico).

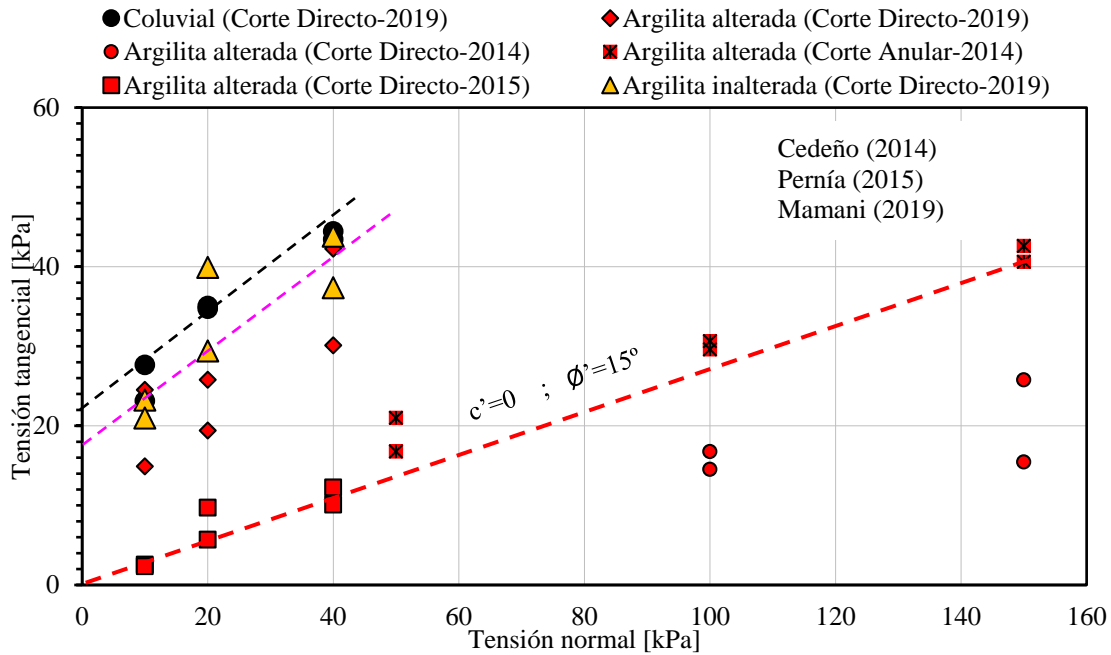
La velocidad máxima de corte que se aplicó en todos los ensayos fue de 0.02 mm/min. Esta velocidad se corroboró después con la curva de asientos en la cual dieron velocidades de 0.02, 0.04 y 0.01 mm/min. Es posible, que la velocidad aplicada no fue suficientemente adecuada para argilita. Por un lado, según Cheung (1988) para suelos que se han formado a partir de la alteración y meteorización del macizo como es el caso de la argilita; no encontró diferencias en los parámetros de resistencia obtenidos a velocidades de 0.007 y 0.6 mm/min. Una velocidad máxima de 0.08 mm/min se considera apropiada para este tipo de suelos.

En la Figura 26 se muestra un resumen de parámetros resistentes de ensayo de corte directo realizado en laboratorio. Además, se complementa con los estudios anteriores de Cedeño (2014) y Pernía (2015), ambos autores se han centrado en caracterizar la argilita alterada donde se encuentra la superficie de rotura.

Para el estrato coluvial se puede observar dos envolventes de Mohr en la Figura 23(b), con valor pico y la otra con valor crítico, la cohesión varía de 22.3 a 18.7 kPa y tiene la misma pendiente; es decir el ángulo de fricción pico y crítico es 32°.

Para la capa de argilita alterada los parámetros resistentes muestran una dispersión importante ver la Figura 26. Este estrato cuenta con varios ensayos en proximidades de la superficie de rotura. Existen ensayos de corte directo y corte anular sometido a distintas tensiones normales. La tendencia de la envolvente de Mohr se ajusta a cohesión cero y ángulo de fricción residual de 15°. Este parámetro se considera posteriormente para el análisis de estabilidad. Aunque, el resultado reciente dio un valor de cohesión residual 9.6 kPa y el ángulo de fricción residual de 27°; estos valores resultaron posiblemente por la influencia de la velocidad de corte.

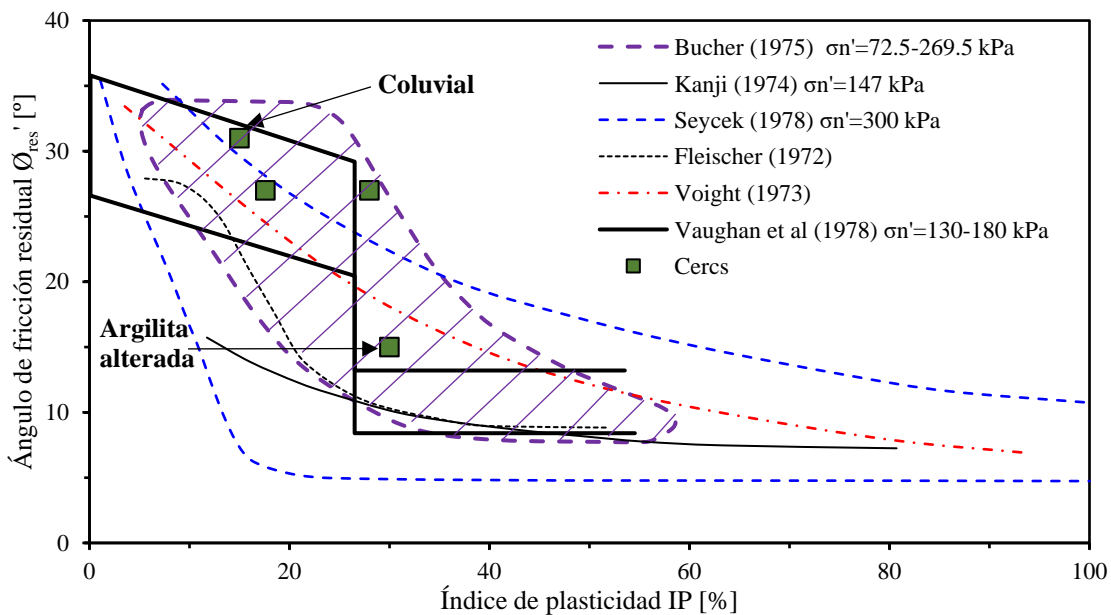
Para la capa de argilita inalterada los parámetros resistentes de cohesión y ángulo de fricción residual dieron 16.9 kPa y 28° respectivamente. Por un lado, las argilitas en varios sitios de España han sido estudiadas, así como en el deslizamiento de La Riba; se determinó los parámetros de argilita roja de cohesión residual 4.5 kPa y el ángulo de fricción residual 28.8° (Alonso y Pinyol, 2007). También, en argilita de Vallcebre los parámetros se encuentran en orden de 0-16 kPa de cohesión residual y 15.1°-33° de ángulo de fricción residual (Corominas et al., 2005). En consecuencia, los parámetros encontrados para este material se encuentran en el rango de estudios anteriores.



**Figura 26:** Resumen corte directo y corte anular para coluvial, argilita alterada y argilita inalterada.

En la Figura 27 se presenta la influencia de índice de plasticidad respecto al ángulo de fricción en materiales finos. Muchos investigadores se han dedicado a estudiar esta correlación, en la cual concluyen que a mayor índice de plasticidad disminuye el ángulo de fricción residual; caso contrario el ángulo de fricción residual puede llegar hasta 40°.

Para corroborar los resultados obtenidos del ensayo de corte directo para el estrato coluvial y argilita; se ha introducido en la gráfica de Lupini (ver Figura 27) y se puede observar que los resultados obtenidos se encuentran en el rango definido por diferentes autores. Además, se concluye que tiene influencia importante el índice de plasticidad en el ángulo de fricción residual.

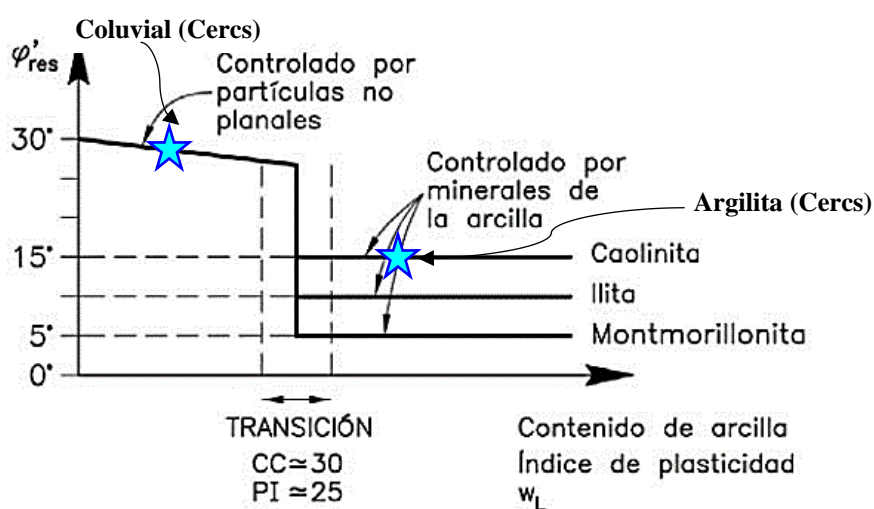


**Figura 27:** Ángulo de fricción residual en función de IP (Lupini et al., 1981).

En la literatura existen correlaciones entre el ángulo de fricción residual y con propiedades-índices básicas de la arcilla, como el contenido de arcilla y el índice de plasticidad. Esta teoría se encuentra fundamentada por diferentes autores (Kenney, 1967; Lupini et al., 1981; Skempton, 1985); además, han idealizado en una representación gráfica como se observa en la Figura 28.

El estrato coluvial fue caracterizado como una arcilla inorgánica de baja plasticidad, IP de 17%, ángulo de fricción residual de 32°, cohesión residual de 18.7 kPa. Según el gráfico de Lupini el coluvial estaría controlado por partículas no planares y el corte ocurre de forma turbulenta.

Mientras para el estrato de argilita, el índice de plasticidad incrementa de 27-29% y el ángulo de fricción residual varía en 15-28°. Es decir, en la zona de rotura el ángulo de fricción residual es de 15°; en cambio, en argilitas intactas el ángulo de fricción es 28°. Según el gráfico de Lupini, las argilitas dependerían del contenido de minerales arcillosos, que posiblemente tengan mayor contenido de caolinita.



**Figura 28:** Gráfico idealizado para ver la variación entre el ángulo de fricción residual y el índice de plasticidad. Basado en Skempton (1985) y Lupini et al (1981).

## 4 SISTEMA DE AUSCULTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS REGISTRADOS

El objetivo de la auscultación en el deslizamiento existente en Cercs fue para entender el comportamiento del terreno frente a la respuesta de agentes atmosféricos como: la precipitación, contenido volumétrico de agua, succión, etc.

### 4.1 Sistema de auscultación en el deslizamiento existente en Cercs

El lugar de estudio cuenta con dos estaciones de monitoreo llamado METEO y SLOPE. La estación METEO registra los datos meteorológicos como: precipitación, humedad relativa, temperatura del aire y presión atmosférica. Mientras, en la estación SLOPE se encuentra auscultada diferentes sensores geotécnicos para medir la presión intersticial, contenido volumétrico de agua, succión, temperatura del suelo y desplazamiento horizontal. En la Tabla 18 se detalla todos los equipos de monitoreo. La auscultación de sensores se ha realizado desde el año 2013. Sin embargo, para este trabajo fue necesario instalar dos nuevos piezómetros de cuerda vibrante y además se realizó la calibración del extensómetro.

El registro de datos en la estación METEO se tiene con una frecuencia de 5 minutos, en cambio en la estación SLOPE la frecuencia es de 15 minutos. Cada estación cuenta con diferentes sensores conectados a un data logger (Loadsensing LS-G6) para recibir, almacenar y enviar datos. Este data logger lleva un sistema de nodo inalámbrico y se comunica a un dispositivo Gateway que envía los datos directamente al servidor de la UPC, por conexión internet. Al mismo tiempo, están disponibles a través de interfaz web que permite visualizar los registros.

**Tabla 18:** Resumen del sistema de instrumentación de Cercs.

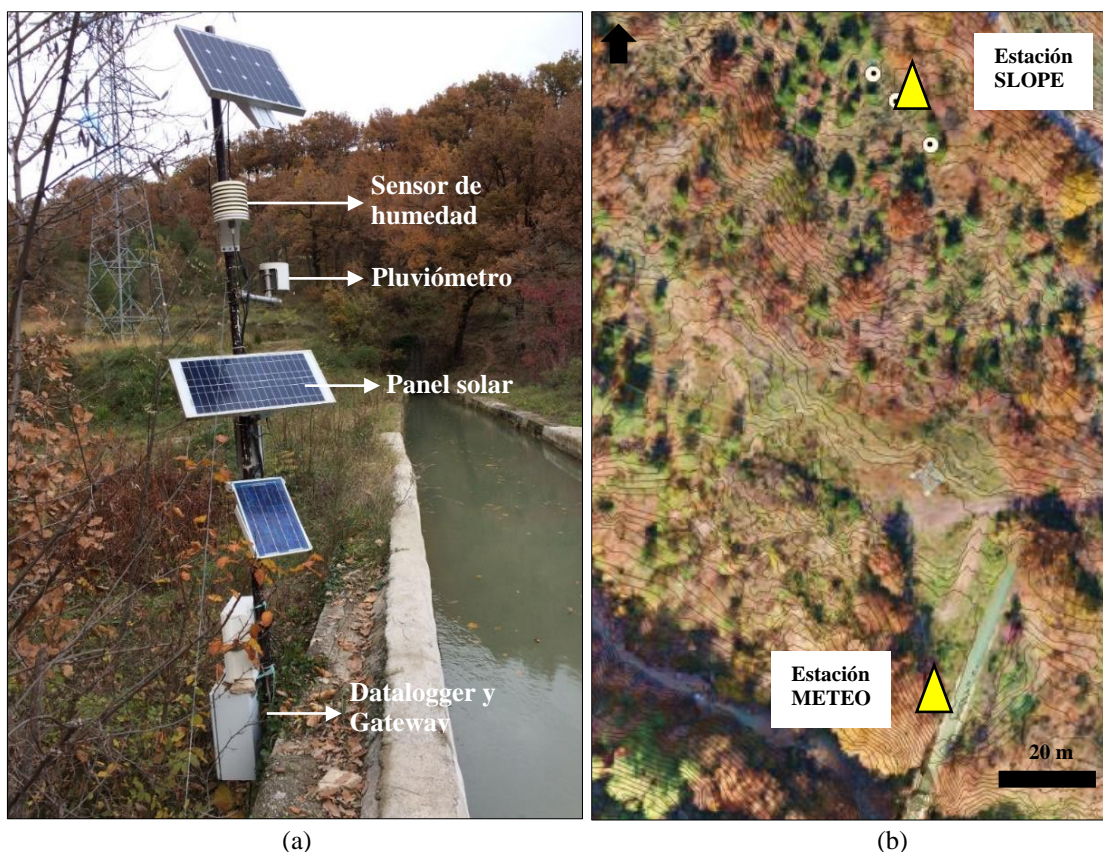
Nombre de Estación.	Tipo de equipos.	Cantidad	Marca y modelo.
METEO	Pluviómetro	1	Decagon ECRN-100
	Sensor de temperatura y humedad relativa del aire	1	Campbell Scientific HC2S3.
	Barómetro	1	Bosch BMP085
SLOPE	Piezómetro de cuerda vibrante.	3	Geosense VWP-3200
	Extensómetro Horizontal.	1	ASM WS12-3000
	Sonda de humedad 10HS	3	Decagon 10HS
	Sensor de potencial de agua dieléctrico (Succión) y sensor de temperatura.	2	Decagon MPS-2

Nota: En 2018 se ha realizado la auscultación de dos piezómetros de cuerda vibrante.

A continuación, se describe cada estación donde se encuentra su emplazamiento y una breve descripción característica de cada equipo.

#### 4.1.1 Estación METEO

La estación METEO se ubica a 120 metros hacia el Sur del deslizamiento existente y con los siguientes sensores: pluviómetro (Decagon ECRN-100), sensor de temperatura y humedad del aire (Campbell Scientific HC2S2) y un barómetro (Bosch BMP085) ver la Figura 29. A continuación, se describe de forma simplificada los sensores y se detalla las especificaciones técnicas de cada uno.



**Figura 29:** (a) Estación meteorológica METEO. (b) Estación METEO y SLOPE en Cercs.

**Decagon ECRN-100.-** Es un pluviómetro de alta resolución para medir la precipitación. El pluviómetro es muy sensible debido a que lleva dos cucharas de volteo en su interior para registrar un conteo por cada 0.2 mm de lluvia que cae según indica el manual de High Resolution Rain Gauge. También a este sistema se le conoce como mecanismo de doble cuchara para tener mejor resolución. En la Tabla 19 se detalla las especificaciones técnicas.

**Tabla 19:** Características y especificaciones técnicas del pluviómetro (Decagon ECRN-100).

Pluviómetro	ECRN-100
Medida:	Precipitación.
Resolución:	0.2 mm.
Tipo de sensor:	Doble cuchara basculante.
Cable de conexión:	3.5 mm conector estéreo.
Salida:	Pulso.
Longitud de cable:	5 m.
Área de captación:	17x14.2 cms.
Entorno operativo:	0 °C a 60 °C.

Fuente: recuperado del manual de High Resolution Rain Gauge (ICT International, s. f.)

**Campbell Scientific HC2S3.-** Es un sensor robusto que mide de forma precisa la temperatura y la humedad relativa del aire. La adquisición de datos se almacena en un data logger, que posteriormente puede ser descargado a un ordenador portátil o transferido vía conexión inalámbrica, los detalles se encuentran en el manual de HC2S3 Temperature and Relative Humidity Instruction (Campbell Scientific, 2018).



**Tabla 20:** Características y especificaciones técnicas del sensor de humedad relativa y temperatura.

Temperatura	
Medida:	Grado centígrado °C.
Sensor:	PT 100 RTD, IEC 751 1/3 Class B.
Rango de medida.	-50 a 100 °C.
Precisión en 23 °C:	+/- 0.1 °C (Config. Estándar).
Salida:	Voltios.
Humedad relativa	
Medida:	Porcentaje.
Sensor:	Rotronic Hygromer IN1.
Rango de medida.	0 a 100 °C.
Precisión en 23 °C:	+/- 0.8% RH (Config. Estándar).
Salida:	Voltios.

Fuente: Manual de HC2S3 Temperature and Relative Humidity Instruction (Campbell Scientific, 2018).

**Bosch BMP085:** Es un barómetro de alta precisión que mide la presión atmosférica de la zona. El sensor BMP085 se basa en una tecnología piezo-resistiva con un convertidor digital. Los datos obtenidos con este sensor son para utilizar las compensaciones de otros sensores como el piezómetro de cuerda vibrante para determinar la presión de agua.

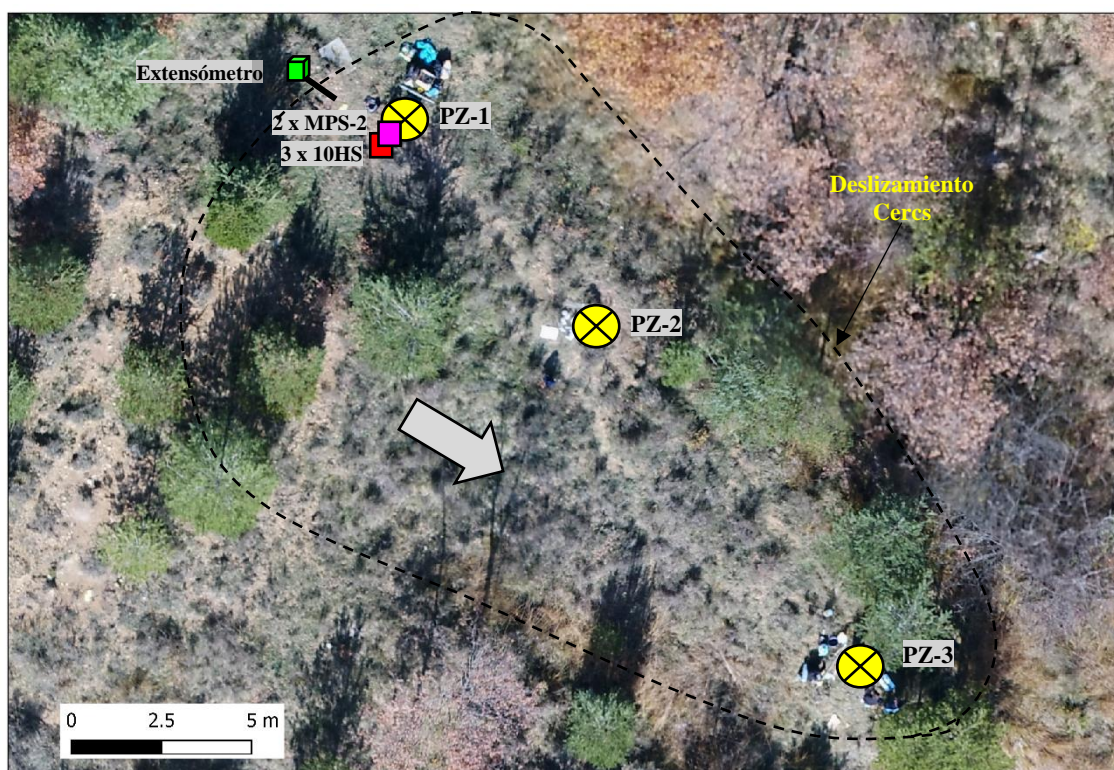
**Tabla 21:** Características y especificaciones técnicas del barómetro.

Barómetro	BOSCH BMP085
Medida:	Bar, mbar.
Rango de medida:	300 a 1100 hPa.
Precisión:	+/- 0.25 hPa, max.
Salida:	hPa.
Entorno operativo:	-40 °C a +85 °C.

Fuente: Manual de BMP085 Digital pressure sensor (Bosch Sensortec, 2009).

#### 4.1.2 Estación SLOPE

La estación SLOPE se ubica en la zona de deslizamiento y fueron auscultados diferentes sensores geotécnicos para medir el comportamiento del terreno. Los sensores están distribuidos de la siguiente manera: en la cabecera del deslizamiento se encuentran instalados los sensores como: un piezómetro (Geosense VWP-3200), un extensómetro (ASM WS12-3000), dos sensores que miden la succión del suelo (Decagon MPS-2) y tres sensores que miden el contenido volumétrico de agua en el suelo (Decagon 10HS); mientras en la parte intermedia y al pie del deslizamiento se encuentra auscultado un piezómetro de cuerda vibrante (Geosense VWP-3200). En la Figura 30 se muestra la distribución de los sensores.



**Figura 30:** Estación SLOPE, cuenta con varios sensores auscultados en el deslizamiento existente.

A continuación, se describe de forma simplificada los sensores y el detalle de las especificaciones técnicas de cada uno.

**Decagon MPS-2.-** Es un sensor dieléctrico para medir el potencial hídrico y la temperatura del suelo. En este trabajo se usa el término de succión en lugar de potencial hídrico del suelo, ya que el potencial hídrico es simplemente el negativo de la succión. El sensor MPS-2 se caracteriza por registrar potencial hídrico en rango amplio de medida. Además, su instalación es sencilla solo requiere un sondeo y colocar en cota de interés y conectar a un nodo data logger para el registro de datos.

**Tabla 22:** Características y especificaciones técnicas del sensor potencial hídrico (succión).

Potencial hídrico / Succión	
Medida:	kPa.
Rango de medida:	-9 a -100 000 kPa.
Resolución:	0.1 kPa.
Precisión:	+/- (25% de lectura + kPa) de -9 a 100 kPa.
Temperatura	
Medida:	Grados centígrados (°C)
Rango de medida:	-40 a 60 °C.
Resolución:	0.1 °C.
Precisión:	+/- 1 °C.

Fuente: Manual de MPS-2 Dielectric Water Potential Sensors (Decagon Devices, 2016).

**Decagon 10HS.-** Es un sensor que mide la constante dieléctrica del suelo usando la tecnología de capacitancia en dominio de frecuencia, para encontrar el contenido volumétrico de agua (VWC). El sensor 10HS usa la frecuencia de 70 MHz mínima para efectos de salinidad y textura, en tal sentido hace que el 10HS sea preciso en la mayoría de los suelos. Además, el 10HS tiene mayor

volumen de influencia de 10 cm de largo para poder medir el suelo donde se hace la instalación, mayores detalles se describe en el manual de 10HS Soil Moisture Sensor (Decagon Devices, 2015). En la siguiente tabla se detalla las especificaciones técnicas.

**Tabla 23:** Características y especificaciones técnicas del sensor de humedad (10HS).

Sensor de humedad	Decagon 10HS
Rango de medida:	0 – 0.57 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (0 – 57 %).
Resolución:	0.0008 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (0.08 %).
Precisión:	0.03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (3% VWC).
Permitividad dieléctrica aparente:	1 (aire) a 50.
Temperatura entorno operativo:	-40 °C a +50 °C.
Tiempo de medida:	10 ms (milisegundos).
Dimensiones (Longitud, ancho, altura):	16 x 3.3 x 0.8 cm.
Longitud de la punta	10 cm.

Fuente: Manual de 10HS Soil Moisture Sensor (Decagon Devices, 2015).

**Geosense VWP-3200.-** Es un piezómetro de cuerda vibrante para medir la presión intersticial en un punto determinado donde se instala el instrumento. Además, se puede calcular en forma rápida la profundidad del nivel freático respecto a la superficie del terreno; es decir, restando la columna de agua que hay por encima del piezómetro de cuerda vibrante. Para el proceso de instalación y para poner en marcha el instrumento, hay que seguir todas las indicaciones del fabricante.

**Tabla 24:** Características y especificaciones técnicas piezómetro de cuerda vibrante.

Piezómetro de cuerda vibrante	Geosense VWP-3200
Filtro de entrada de aire:	LAE. (Baja entrada de aire)
Rango de medida de presión:	-70 a 173 kPa.
Resolución:	+/- 0.025% FS (escala completa).
Precisión:	+/- 0.1% FS.
Efecto termal:	Menos que 0.02% FS por °C.
Rango de temperatura operacional:	-20 a 80 °C.
Sensor de temperatura:	Termistor (3kΩ @ 25 °C).
Longitud y diámetro.	218mm y 25mm.

Fuente: Manual de instrucciones del piezómetro de cuerda vibrante VWP (Geosense, 2015).

**ASM WS12-3000.-** Es un equipo llamado sensor de posición (WS/POSIWIRE Position Sensors), cuyo objetivo es para medir los movimientos horizontales. El principio del sensor es transformar el movimiento del cable en una señal eléctrica en voltios. También, a este instrumento se le llama extensómetro horizontal. La instalación se realiza generalmente en un escarpe.

**Tabla 25:** Características y especificaciones técnicas del extensómetro horizontal.

WS/POSIWIRE Position Sensors	ASM WS12-3000
Rango de medida:	3000 mm.
Resolución:	< 0.002% FS (escala completa).
Linealidad:	+/- 0.1% FS.
Rango de temperatura operacional:	-20 a 80 °C.
Salida de datos:	Voltios.

Fuente: Manual de instrucciones del cedor WS12-3000 Posiwire Position Sensor Datasheet (ASM sensor, 2017).

#### 4.1.3 Estación meteorológica de Guardiola de Berguedà

La estación meteorológica de Berguedà se ubica al norte de la zona de estudio a 10 km de distancia, expresada en la coordenada UTM (Este: 407163; Norte: 4676386 y una altitud de 788 msnm) zona 31N.

La estación está gestionada por el Servicio Meteorológico de Cataluña, con código de identificación asignado WV “Guardiola de Berguedà”. Además, esta estación pertenece a la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (XEMA), integrada en la Red de Equipamiento Meteorológico de la Generalidad de Cataluña (XEMEC).

La estación Guardiola de Berguedà cuenta con registros de datos meteorológicos temporales como: horaria, diaria y mensual, cuya información se puede obtener directamente a través de la página web: <http://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions>. En un formato de fichero Excel. También, se puede solicitar directamente a los encargados de la estación meteorológica de XEMA a “dades.meteocat@gencat.cat”.

Los datos meteorológicos que tiene son: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento y radiación solar. En la tabla siguiente se detalla las variables meteorológicas con su codificación y unidades de medida diaria.

**Tabla 26:** Codificación de variables meteorológicas de la estación Guardiola de Berguedà.

Código	Variable	Unidad
TM	Temperatura media diaria.	°C
TX	Temperatura máxima diaria.	°C
TN	Temperatura mínima diaria.	°C
HRM	Humedad relativa media diaria.	%
PM	Presión atmosférica media diaria.	hPa
PPT24H	Precipitación acumulada diaria.	mm
RS25H	Radiación solar diaria.	MJ/m <sup>2</sup>
VVM10	Velocidad media diaria del viento a 10 m.	m/s
DVM10	Dirección media diaria del viento a 10 m	°
VVX10	Racha máxima diaria del viento a 10 m.	m/s
DVVX10	Dirección de la racha máxima diaria del viento a 10m	°

Fuente: Información meteorológica de la estación Guardiola de Berguedà (Servicio Meteorológico de Cataluña, 2019).

#### 4.2 Verificación y calibración de sensores geotécnicos en laboratorio

Para el presente estudio se ha verificado la calibración en dos piezómetros de cuerda vibrante (Geosense VWP-3200); un sensor de posición (ASM WS12-3000) conocido también como extensómetro horizontal y un convertidor analógico SDI-12 del modelo 4015 para el sensor MPS-2. En la Tabla 27 se muestra los detalles.

**Tabla 27:** Verificación y calibración de los sensores geotécnicos en laboratorio e instalación en campo.

Equipo/Sensor.	Fecha de verificación.	Fecha de instalación en campo.	Comentario
Geosense VWP-3200_1	05/11/2018	16/11/2018	Piezómetro de cuerda vibrante.
Geosense VWP-3200_2	05/11/2018	16/11/2018	Piezómetro de cuerda vibrante.
ASM WS12-3000	07/11/2018	16/11/2018	Extensómetro horizontal.
SDI-12 del modelo 4015	24/04/2019	26/04/2019	Convertidor digital a analógico.

#### **4.2.1 Verificación de piezómetro de cuerda vibrante**

Se ha verificado la calibración de dos piezómetros de cuerda vibrante con N° serial 334250 y 334251 respectivamente. Esta tarea se realizó con el objetivo de asegurar la calidad de datos que se registrará en campo. El trabajo de verificación se realizó en el laboratorio de la UPC, el cual consistió en someter a los piezómetros con cargas hidráulicas variables para obtener el registro de presión hidráulica. Para obtener la presión de agua en unidades ingenieriles se ha utilizado la ecuación lineal y polinomial. Las ecuaciones están expresadas en función de factores de calibración A, B y C. Cabe resaltar, las constantes A y B son factores de calibración propios de cada instrumento, mientras el factor C, depende de la lectura inicial y el lugar del ensayo. A continuación, se describe con detalle el proceso de verificación.

##### ***Materiales y equipos***

- Un tubo transparente con 10 cm de diámetro y 150 cm de longitud.
- Data loggers para la adquisición de datos.
- Un dispositivo Android para visualizar las lecturas (móvil).
- Piezómetro de cuerda vibrante y cable.
- Una manguera transparente 3/4" de diámetro.
- Una cubeta de 10 litros.

##### ***Procedimiento de verificación de los piezómetros de cuerda vibrante***

Para iniciar con el proceso de verificación, se ha tomado en cuenta las indicaciones del manual de instrucciones (Geosense, 2015) para evitar daños y errores en las conexiones previas entre piezómetro y data logger.

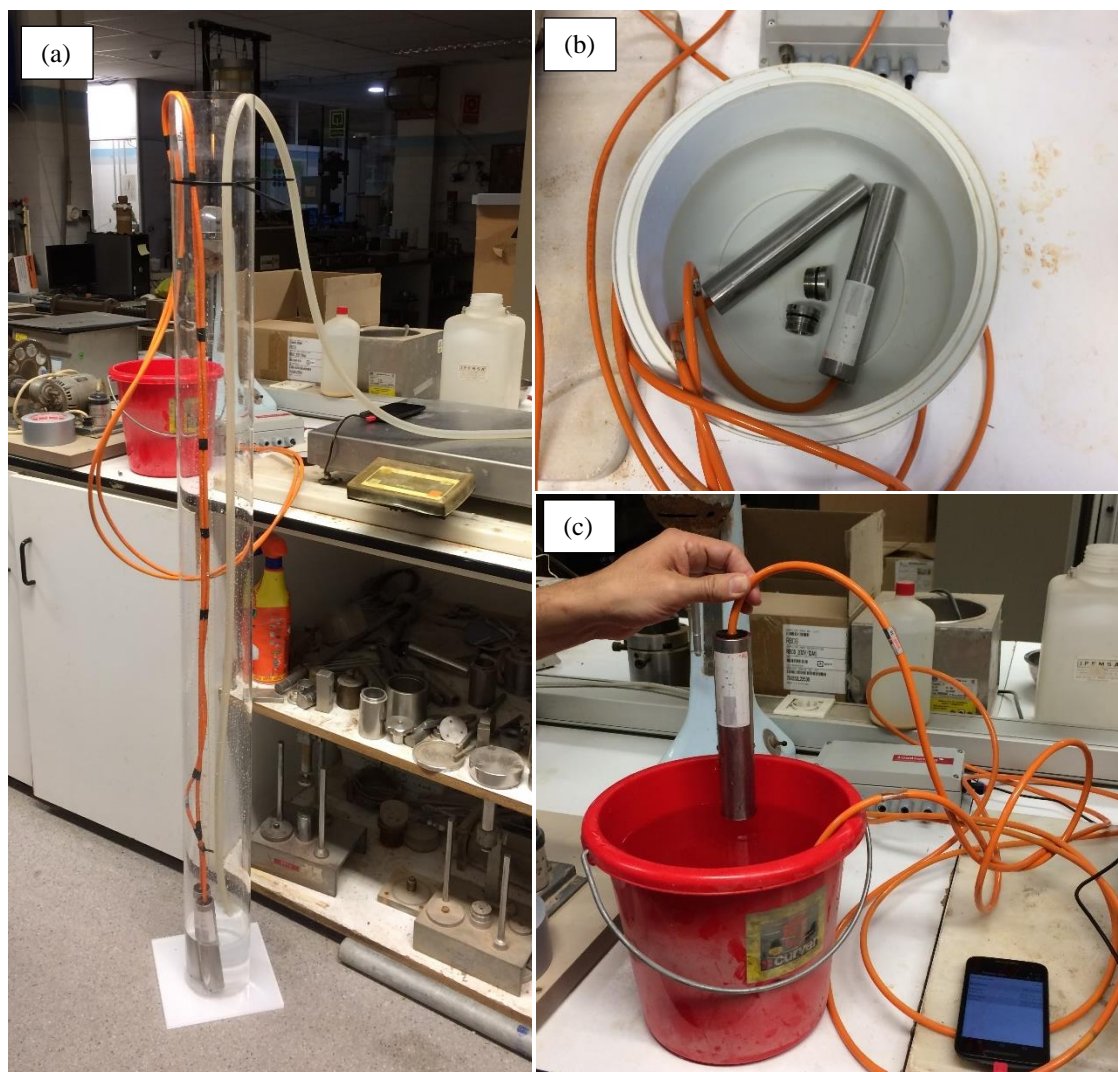
Primero. - Se ha colocado los piezómetros de cuerda vibrante en el fondo de una cubeta con agua. En seguida se retiró cuidadosamente el filtro del piezómetro (Figura 31b). Y se dejó dentro del agua más de una hora para lograr la saturación completa de los filtros. Después, se verificó la presión hidráulica con el data logger. El objetivo es que no tenga variaciones de presión considerables en 2 a 5 minutos.

Segundo. – Se ha tomado la lectura base o llamada también lectura cero; la cual consistió en levantar por medio del cable el cuerpo del piezómetro de la cubeta, sin que tenga contacto con el agua. Luego, de forma rápida se realizó tres lecturas de presión en Hertz (Hz), temperatura en Ohms y la presión atmosférica en mbar. Luego se volvió a colocar los piezómetros dentro del agua y se repitió el proceso por tres veces.

Tercero. – Al tener tres lecturas se ha procedido a colocar los filtros a los piezómetros sumergidos bajo el agua. Por un lado, se preparó una probeta de 150 cm de longitud y 10 cm de diámetro con medidas graduadas. En esta probeta se vertió agua de 785.40 mililitros que corresponde a 10 cm de columna de agua. En seguida, se ha retirado los piezómetros de la cubeta y se colocó en la probeta (Figura 31a) y luego se tomó las lecturas de presión, temperatura y presión atmosférica.

Cuarto. – Para las siguientes lecturas se ha añadido agua con incrementos de 10 cm de columna hasta completar los 150 cm respectivamente. En cada incremento de 10 cm de columna de agua se ha tomado el registro de presión hidráulica, temperatura y presión atmosférica; los datos se encuentran en el Anexo 1. Una vez culminado el ensayo se recogió los piezómetros, data logger, etc. para guardar en un lugar determinado.





**Figura 31:** Proceso de verificación del piezómetro. (a) Probeta para añadir distintas cargas hidráulicas. (b) Piezómetros sumergidos en agua sin filtro. (c) Proceso de toma de datos para la lectura cero.

### *Factores de calibración de los piezómetros de curda vibrante*

Los datos registrados durante el ensayo se encuentran expresados en otras unidades, por ende, es necesario convertir a unidades ingenieriles y corregir por el factor termal. En la Tabla 28 se detalla los factores que se emplean para calcular la presión de agua. Cabe resaltar, que cada sensor tiene un único valor de calibración.

**Tabla 28:** Factores de calibración de los piezómetros.

Factores de calibración	Piezómetro de canal 1 (N° serial 334250)	Piezómetro de canal 2 (N° serial 334251)	Unidad
Factor Lineal k	-0.047901366	-0.052245329	kPa por dígitos.
Factor Polinómica A	-2.00363E-07	-2.39166E-07	kPa.
B	-0.044902999	-0.048647444	
C	434.0822399	466.3323212	
Factor Termal K	0.122254005	-0.02192774	kPa por °C.

Nota: Para el factor polinómica "C" se recalcula a través de la lectura inicial.

## Cálculo de presión de líquido para convertir a unidades ingenieriles

### Ecuación lineal

$$L = k(R_i - R_0) + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0) \quad (22)$$

Donde: L es la presión calculada de la ecuación lineal (kPa); k factor de calibración para ecuación lineal;  $R_0$  lectura inicial y  $R_i$  lectura actual de presión en dígitos; K factor termal;  $T_0$  lectura inicial y  $T_i$  lectura actual de temperatura en °C; F factor de conversión de presión atmosférica (kPa);  $S_0$  lectura inicial y  $S_i$  lectura actual de presión barométrica.

### Ecuación polinómica

$$P = AR_i^2 + BR_i + C + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0) + D \quad (23)$$

Donde: P es la presión calculada de la ecuación polinómica (kPa); A, B y C factor de calibración polinómica;  $R_i$  lectura actual de presión en dígitos; K factor termal;  $T_0$  lectura inicial y  $T_i$  lectura actual de temperatura en °C; F factor de conversión de presión atmosférica (kPa);  $S_0$  lectura inicial y  $S_i$  lectura actual de presión barométrica y D unidad de desfase. El factor de calibración “C” es calculado a partir de la lectura inicial con la ecuación  $C_{cal} = -AR_0^2 - BR_0$ .

### Para calcular la temperatura

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3} - 273.2 \quad (24)$$

A: 1.4051E-03

B: 2.369E-04

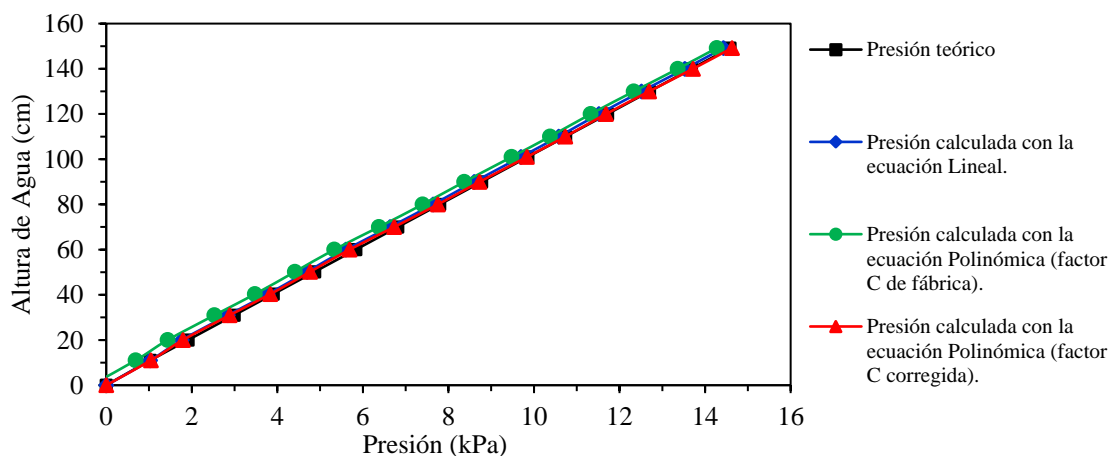
C: 1.019E-07

Donde:

T es la temperatura en °C,

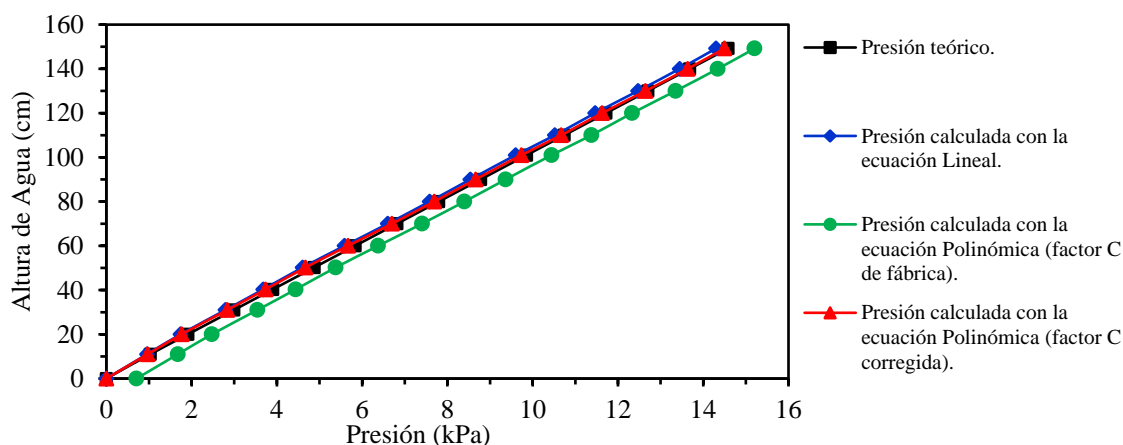
A, B y C son factores de conversión para temperatura;

R es la lectura de la temperatura en Ohms.



**Figura 32:** Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334250.





**Figura 33:** Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334251.

De la Figura 32 y 33 se concluye que la presión de agua calculada a partir de la ecuación polinómica es la que mejor se ajusta a la recta teórica. Y el factor de calibración “C” fue obtenido a partir de la lectura inicial. El error máximo que presenta la formulación polinómica para obtener la presión de agua es de 0.15 para piezómetro N° serial 334250 y 0.20 kPa para el piezómetro N° serial 334251. Sin embargo, con la ecuación lineal el error máximo es mayor y varía en 0.23 a 0.28 kPa respectivamente.

En este trabajo todos los datos que se dispone de piezometría son del año 2015 al 2019 registrada en ladera Cercs; Para ello, se ha calculado con la fórmula polinómica. Además, el factor “C” fue obtenido a partir de la lectura inicial realizada en la zona de estudio. Cabe resaltar, que la presión atmosférica varía de acuerdo a la zona y altitud.

#### 4.2.2 Calibración del extensómetro horizontal sensor (ASM WS12-300)

El objetivo fue encontrar una ecuación para convertir las medidas de voltios a desplazamientos acumulados en mm. Por ello, se realizó el experimento en el laboratorio de la UPC.

Los materiales y equipos necesarios son los siguientes: cinta métrica de 3 m de longitud, data logger, un dispositivo Android para visualizar las lecturas, sensor de posición ASM WS12-300 (extensómetro horizontal) y cables de conexión.

##### *Procedimiento de calibración de extensómetro horizontal*

Para realizar el proceso de calibración, se ha tomado en cuenta las indicaciones del manual de instrucciones de “Position Sensors ASM WS12-300” para una correcta manipulación y conexiones con data logger.

Primero. - Se hace conexiones entre el sensor-data logger y un dispositivo Android (móvil). En seguida, se extiende la cinta métrica sobre una superficie plana (Figura 34a) y se hace coincidir el inicio de la cinta métrica con la salida lineal de señal eléctrica del sensor ver Figura 34(b). La salida lineal está conformada por un cable no elástico.

Segundo. - Una vez que se tiene todo instalado, se aplica una fuerza a la salida lineal (cable no elástico) a lo largo de la cinta métrica; tomando el registro cada 10 mm hasta 3000 mm, los datos se encuentran en el Anexo 1. Una vez culminado el proceso se recogen todos los equipos.



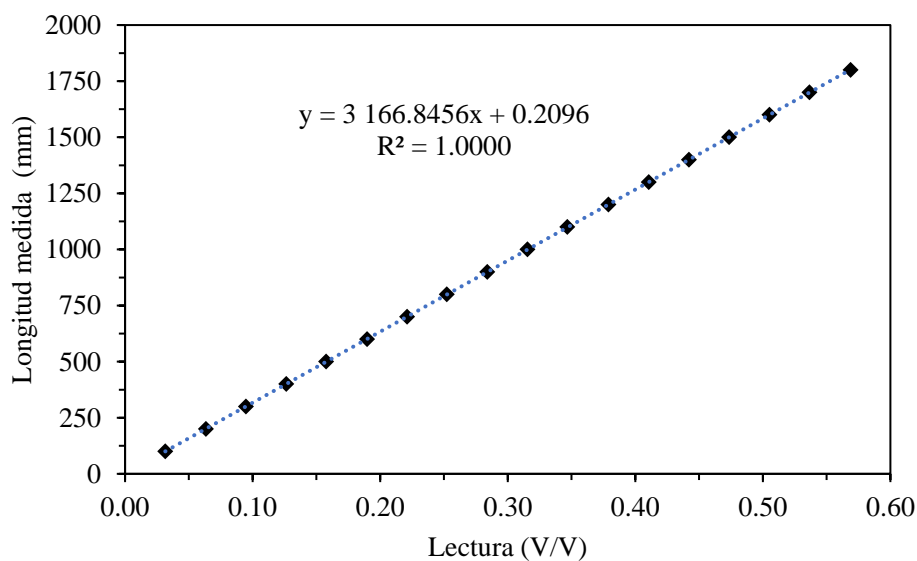
**Figura 34:** Proceso de calibración del sensor (extensómetro horizontal). (a) Instalación sobre superficie plana. (b) Extensómetro horizontal con salida lineal de señal eléctrica de un cable no elástico.

Los datos registrados durante el ensayo son: la longitud medida en milímetros con la cinta métrica y la lectura del sensor en unidad adimensional voltios/voltios. Mediante una correlación lineal se obtiene la ecuación para encontrar el desplazamiento acumulado en mm (Figura 35).

Los datos experimentales no muestran dispersión, de manera que la desviación estándar es uno, lo que indica que existe una buena relación entre ellos. Por lo tanto, la ecuación para calcular el desplazamiento acumulado queda de la siguiente manera:

$$\Delta P = FR(R_i - R_0) + C \quad (25)$$

Donde:  $\Delta P$  desplazamiento en (mm);  $R_0$  lectura inicial y  $R_i$  lectura actual en voltios; FR es el factor de calibración 3166.8456 y C es la constante (0.2096).



**Figura 35:** Factor de calibración del extensómetro horizontal.

### 4.2.3 Instalación del conversor SDI-12 para el sensor MPS-2

#### *Descripción del sensor MPS-2 y el convertidor analógico SDI-12*

El sensor MPS-2 mide el potencial hídrico del suelo y su rango de medida comprende desde -9 hasta -100 000 kPa, con una resolución de 0.1 kPa. Los datos se registran de forma continua a una frecuencia determinada y los datos se almacenan en un data logger. Además, el sensor MPS-2 se puede comunicar con un convertidor analógico de SDI-12.

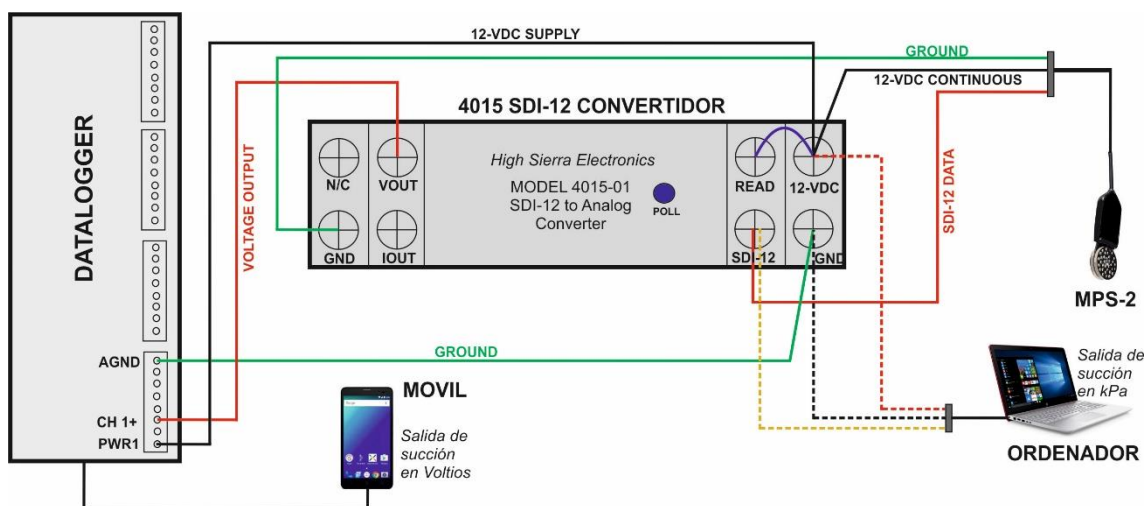
El convertidor SDI-12 de modelo 4015 se utiliza como un interfaz entre la comunicación del sensor MPS-2 y data logger. Es decir, el SDI-12 recibe los datos de succión en kPa del sensor MPS-2 y transfiere los datos a un data logger en voltaje. Para ello, se requiere conocer la relación que existe entre succión vs voltaje. Razón, por la cual se realizó el ensayo en un suelo variando el contenido de humedad.

#### *Materiales y equipos*

- Convertidor analógico SDI-12 de modelo 4015.
- Sensor MPS-2.
- Data logger.
- Ordenador (laptop portátil).
- Un dispositivo Android (móvil) para visualizar las lecturas.
- Suelo de aproximadamente de 3.0 kilogramos.
- Recipiente para el ensayo 25cm de diámetro y 20 cm de altura.
- Bandeja para hacer la mezcla de suelo y agua.

#### *Procedimiento*

Primero se realiza las conexiones necesarias entre el sensor MPS-2, convertidor analógico SDI-12, data logger, ordenador portátil y teléfono móvil; como se aprecia en un diagrama presentado en la Figura 36. La conexión al ordenador y móvil son para visualizar el registro del sensor MPS-2 y también para configurar.



**Figura 36:** Esquema de conexión: Convertidor SDI-12, MPS-2, data logger, ordenador y el móvil.

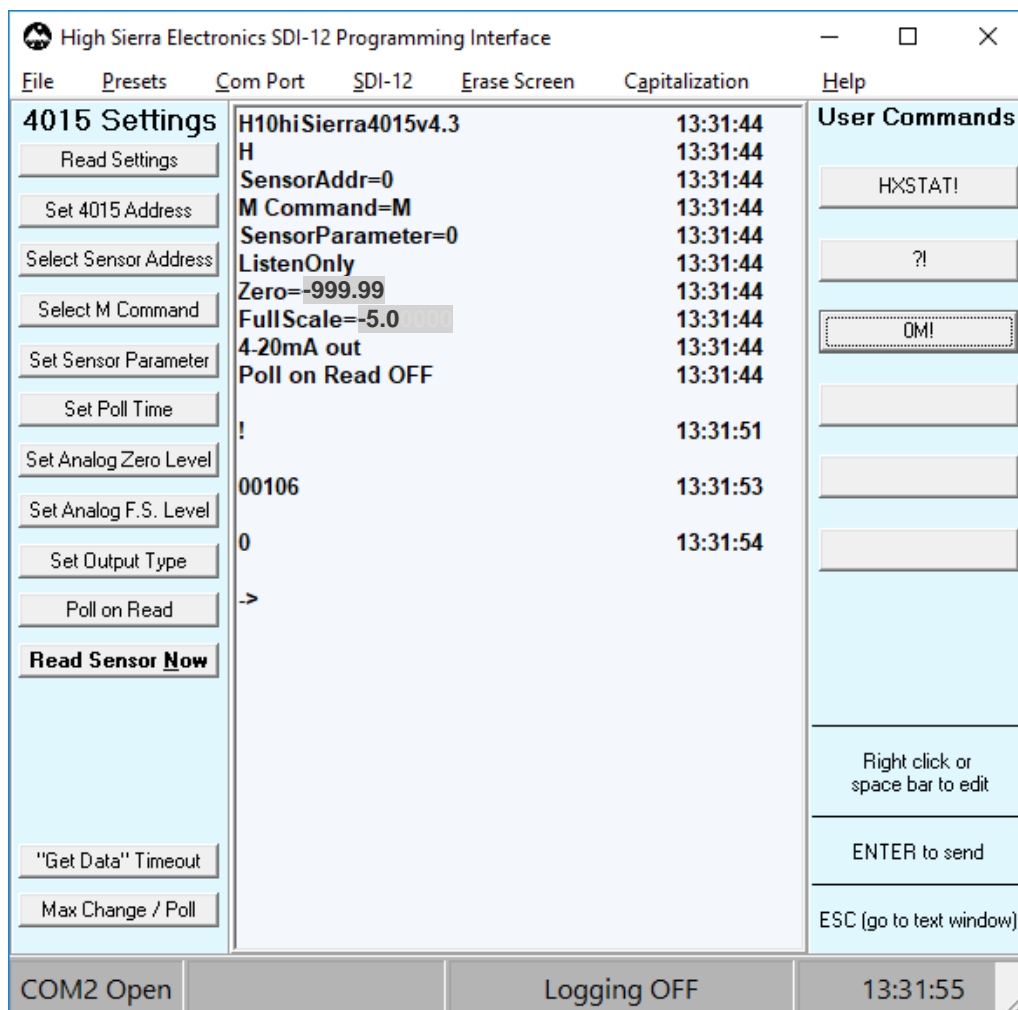
Al concluir con las conexiones; desde el ordenador ejecutar el software SDI12Interface.exe de High Sierra Electronics Inc., en el menú "Com Port" se asignó COM4 (entrada USB); luego, en el menú "Presents" se seleccionó el dispositivo 4015 y con la dirección H (mayúscula), la cual viene predeterminada desde la fábrica. Antes de iniciar la configuración se comprobó la

comunicación entre el SDI-12 y el sensor MPS-2; para ello, se ejecutó el comando “0M!” para ver la respuesta del sensor; en seguida se realizó la configuración de la siguiente manera:

- “Select Sensor Address” = 0 (Se establece la dirección del sensor).
- “Select M Command” = M (Se seleccionó el comando M).
- “Set Sensor Parameter” = 0 (Se establece el parámetro del sensor).
- “Set Sensor Poll Time” = 30 (Se conf. el tiempo de medida del sensor).
- “Set Analog Zero Level” = -999.99 (Se establece el valor mínimo para el sensor MPS-2).
- “Set Analog F.S. Level” = -5 (Se establece el valor máximo para el sensor MPS-2).
- “Set Output Type” = 0-20 mA (Se establece el tipo de salida).
- “Poll on Read” = disable.

Mayores detalles y la lista de comandos se encuentran en el manual de instrucciones de SDI-12 convertidor de entrada y salida analógica (High Sierra Electronics Inc., 2016). En la Figura 37 se puede observar la configuración.

El sensor MPS-2 mide el potencial hídrico en rango de -9 a -100 000 kPa, sin embargo, el convertidor SDI-12 solo tiene el rango de medida 0 a 5 voltios. La función del convertidor es recibir datos digitales de MPS-2 y transferir datos a un data logger en voltios. Por un lado, el SDI-12 tiene un limitante en número de dígitos hasta 999.99 dígitos.

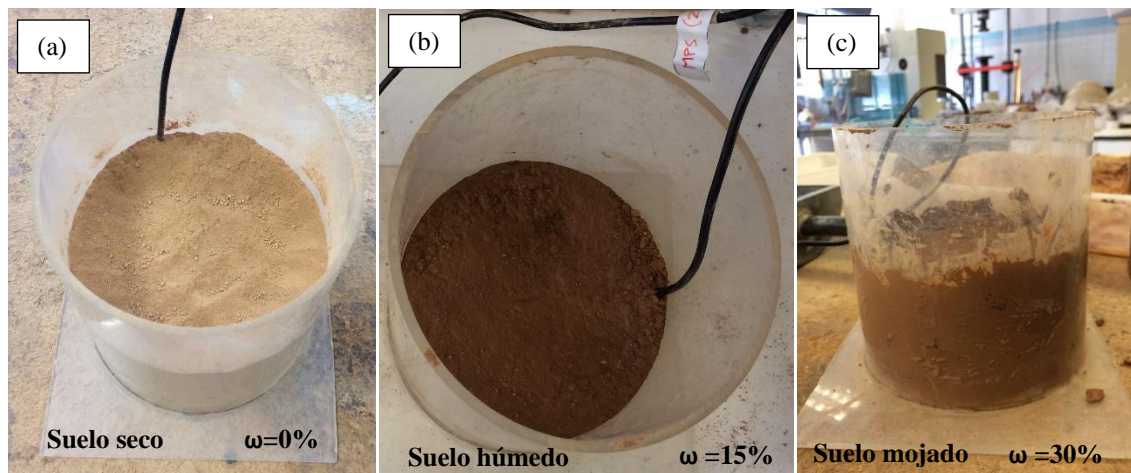


**Figura 37:** Configuración de 4015 en software SDI12Interface.exe de High Sierra Electronics.

Para obtener la relación entre la succión en kPa vs voltios fue necesario hacer varias medidas a distintas humedades. Para ello, se dispone del suelo arcilloso de baja plasticidad (CL) proveniente de Agrópolis UPC, cuya clasificación granulométrica fue realizada en la tesis de “Diseño de un experimento a gran escala para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas” (Oorthuis, 2016). Este material tiene las características similares a coluvión de Cercs. Por ende, el suelo de Agrópolis se utilizó para el experimento.

Para uniformizar el tamaño de los granos, primero fue reducido los terrones con un mazo de goma y luego hacer pasar por el tamiz N° 10 (abertura 2 mm). En seguida, se ha adicionado agua en proporciones de: 100, 200, 300, 400, 500 y 600 mililitros respectivamente hasta saturar por completo el suelo. En la Figura 38 se muestra desde un suelo seco hasta la saturación al 100%.

En la Figura 38(a) se muestra el suelo seco con humedad 0% y la succión se encuentra entre 4500 a 7500 kPa; mientras, el voltaje fue registrado 0 (cero). Por otro lado, en la Figura 38(b) el suelo ha sido añadido 300 ml de agua logrando una humedad de 15%, la succión disminuye entre 300 a 400 kPa, y el voltaje fluctúa en 3.5 a 4.0 voltios. Finalmente, en la Figura 38(c) se logra saturar el suelo con 600 ml de agua, obteniendo el contenido de humedad 30%, la succión disminuye a menores de 10 kPa, mientras el voltaje llega al rango máximo de 5.0 voltios.



**Figura 38:** Proceso de humedecimiento del suelo. a) Suelo seco, b) Suelo húmedo y c) Suelo mojado.

### ***Resultados y obtención de la ecuación para calcular la succión a partir de voltios***

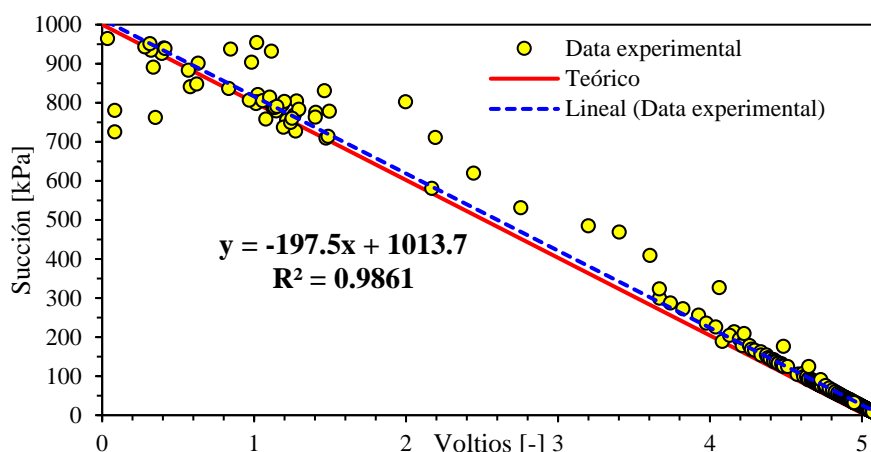
El registro de datos se ha realizado mediante dos sistemas. 1) Almacenamiento de datos en data logger en unidades de medida Voltaje y 2) almacenamiento de datos de succión en el ordenador mediante el interfaz de software SDI12Interface.exe conectado al conversor SDI-12 de modelo 4015, cuya unidad de medida es expresada en kPa.

En la Figura 39 se muestra la relación entre el valor de la succión vs voltaje, donde se puede observar que existe una buena correlación entre ellas, aunque algunos puntos no se ajustan a la línea teórica; debido a los errores durante el proceso experimental. La línea teórica comprende que para una succión de 1000 kPa equivale a 0 Voltios y para 5 kPa de succión equivale a 5 Voltios.

Mediante la correlación lineal se obtiene la siguiente expresión para calcular la succión:

$$\text{Succión [kPa]} = -197.5 * \text{Voltaje} + 1013.7 \quad (26)$$





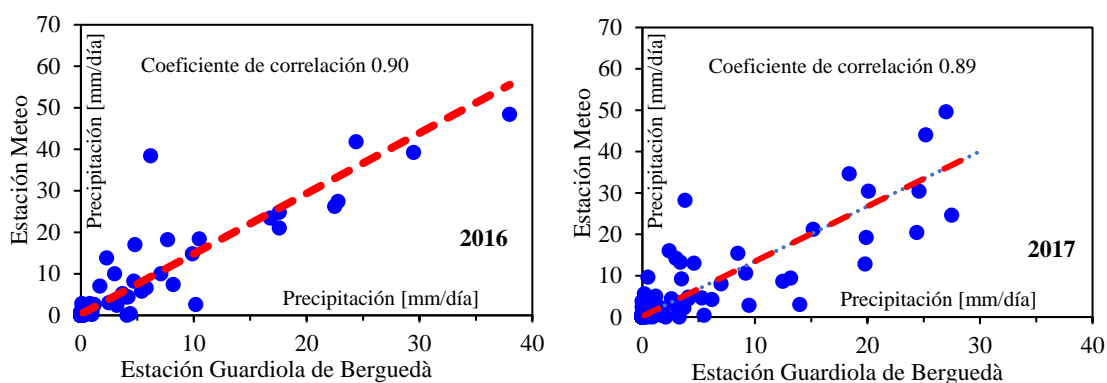
**Figura 39:** Relación entre succión kPa y Voltios, para una arcilla de baja plasticidad.

### 4.3 Análisis de datos registrados por el sistema de auscultación

#### 4.3.1 Precipitación

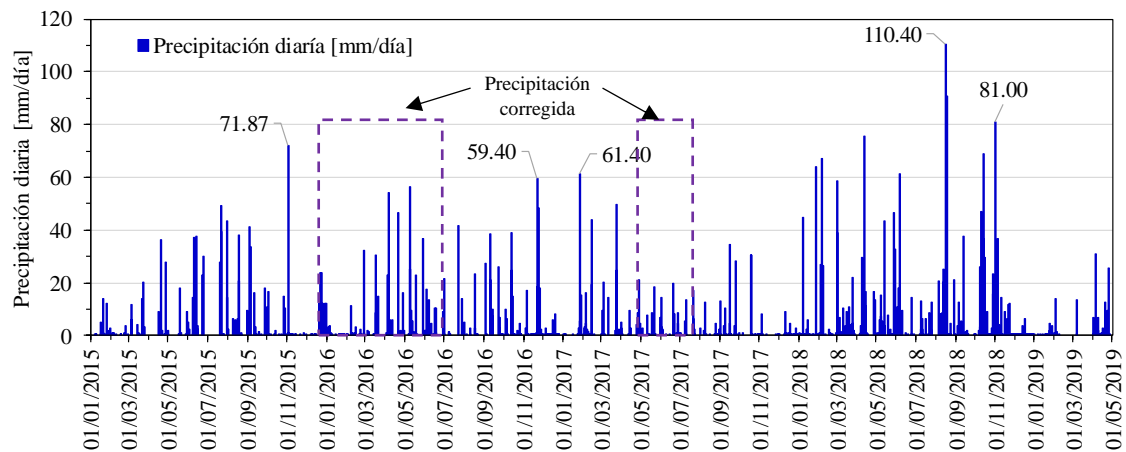
En la estación METEO se ha registrado las precipitaciones pluviales mediante un pluviómetro con frecuencia de medida cada 5 minutos. La gestión de datos y mantenimiento del equipo es realizada por la UPC. En este trabajo TFM se analiza los datos de precipitación desde enero del 2015 hasta abril del 2019. En la Figura 41 se puede apreciar las precipitaciones diarias.

El pluviómetro no registró los datos en dos períodos, entre el 01 de enero al 30 de junio del 2016 y 30 de abril al 22 de julio del 2017; debido al mantenimiento del equipo. Estos datos faltantes han sido completados de acuerdo a la estación meteorológica Guardiola de Berguedà, que se ubica a 10 km de la estación METEO. Para completar los datos se usó el método de regresión lineal entre los datos de estación METEO y la estación meteorológica Guardiola de Berguedà. En el cual resultó el coeficiente de correlación 0.89 y 0.90; este valor indica que es posible ajustar mediante esta regresión lineal, ver la Figura 40.



**Figura 40:** Regresión lineal para completar los registros de precipitación en la estación Meteo.

La precipitación en el 2015 alcanzó 1023.27 mm/año, registrando la racha más crítica el 02 de noviembre con 71.87 mm/día. Mientras, la precipitación acumulada en 2016 fue de 1097.27 mm/año, con un episodio crítico ocurrido el 21 de noviembre del 2016 con 59.40 mm/día. Por un lado, la precipitación acumulada en 2017 fue menor que los años anteriores de 754.67 mm/año, presentando un episodio crítico el 27 de enero del 2017 con 61.40 mm/día. Sin embargo, la precipitación acumulada en el año 2018 fue la más alta de todos los años con 1872.60 mm/año, la racha más alta registrada el 16 de agosto del mismo año con 110.40 mm/día, ver la Figura 41.



**Figura 41:** Precipitaciones pluviales en la estación METEO registrado desde 2015 al 2019.

#### 4.3.2 Piezometría

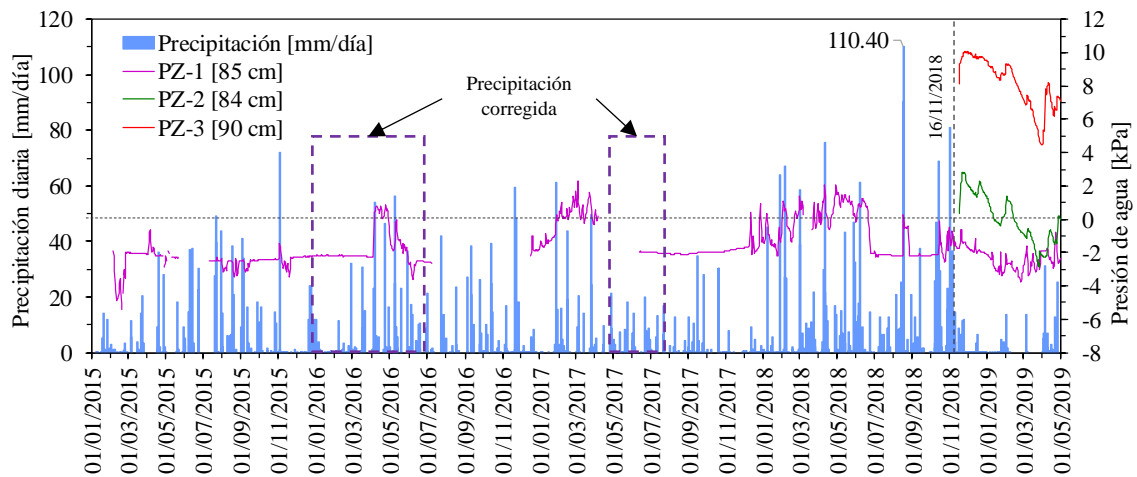
Para la medida de presión intersticial en el terreno, se ha utilizado piezómetros de cuerda vibrante con baja entrada de aire en sus filtros. Este instrumento es robusto y apto para hacer seguimiento a largo plazo en la zona de deslizamiento en Cercs. Con los registros de presión de agua se ha definido la superficie de agua o de nivel freático para su posterior análisis de estabilidad.

El piezómetro PZ-1 se encuentra instalado en la cabecera del deslizamiento, a una profundidad de 0.85m, la auscultación se realizó en primavera del 2013. Sin embargo, para el presente trabajo se analiza los datos desde enero del 2015 hasta abril del 2019. En la Figura 42, se presenta el registro de presión intersticial que varía desde -5.41 a 2.30 kPa a lo largo del tiempo (2015-2019), donde se puede observar que en su mayoría se ha registrado presiones negativas que positivas. La presión negativa indica la medida de succión y la presión positiva indica la medida de presión de agua. También, en la Figura 42 se puede observar que cuando las precipitaciones alcanzan valores mayores a 50 mm/día de intensidad, la presión intersticial aumenta hasta 2.3 kPa, lo que significa que el piezómetro registra 23 cm de columna de agua.

El piezómetro PZ-2 se encuentra instalado en la parte intermedia del deslizamiento, a una profundidad de 0.84m, fue auscultado el 16 de noviembre del 2018. El registro de presión intersticial varía desde -2.0 a 2.83 kPa desde noviembre del 2018 hasta finales de abril del 2019 como se aprecia en la Figura 42.

Por un lado, el piezómetro PZ-3 se encuentra instalado en el pie del deslizamiento, a una profundidad de 0.90 m, fue auscultado en la misma fecha que el piezómetro PZ-2. El registro de presión intersticial varía entre 4.43 a 10.0 kPa como se aprecia en la Figura 42. En diciembre del 2018 se registró que el terreno está saturado, es decir el nivel freático se encuentra en superficie en el pie del deslizamiento.





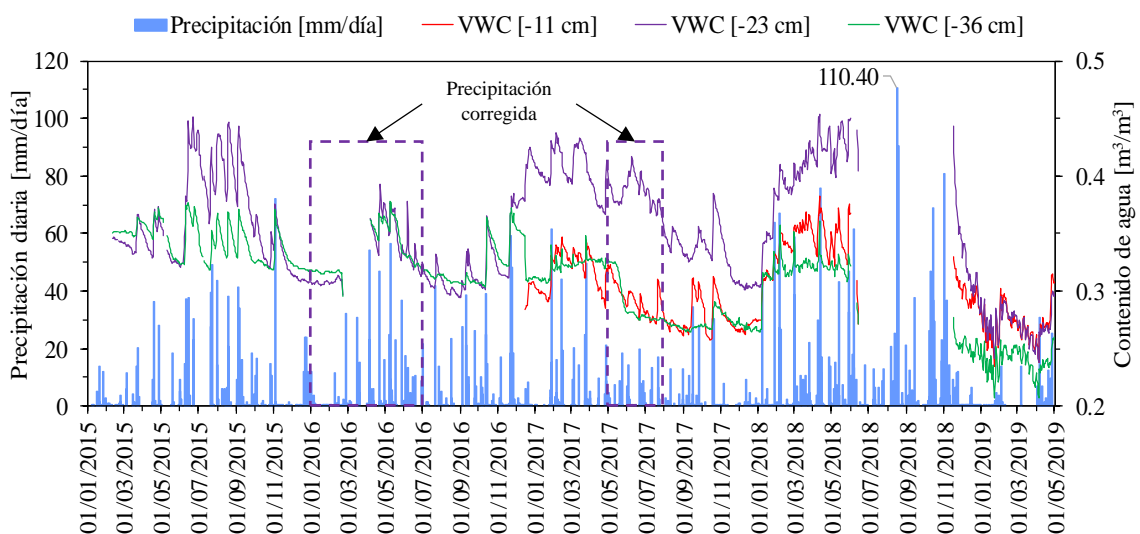
**Figura 42:** Registro de presión de agua en el terreno desde enero del 2015 hasta abril del 2019.

### 4.3.3 Contenido volumétrico de agua en el terreno

Para medir el contenido volumétrico de agua en la zona de deslizamiento, se ha auscultado tres sensores de 10HS a profundidades de 11, 23 y 36 cm. El sensor auscultado a 11 cm de profundidad se realizó a finales del 2016. Y los sensores que se encuentran a profundidades de 23 y 36 cm se han auscultado en primavera del 2013.

Para este trabajo solo se analiza los datos de contenido volumétrico de agua desde enero del 2015 a finales de abril del 2019; de los cuales, entre julio a noviembre del 2018 no se registró datos, por causa de problemas electrónicos en el equipo.

En la Figura 43 se aprecia que el contenido volumétrico de agua guarda una relación directa con la precipitación pluvial; es decir, cuando la precipitación diaria supera los 20 mm/día los cambios en contenido volumétrico de agua se observa claramente. Por un lado, para el sensor que se encuentra a mayor profundidad que es de 36 cm, el contenido volumétrico de agua es menor que el sensor que se ubica a 23cm de profundidad. Este comportamiento es coherente, es decir cuando está más cerca a la superficie, el sensor responde con mayor rapidez a la precipitación.

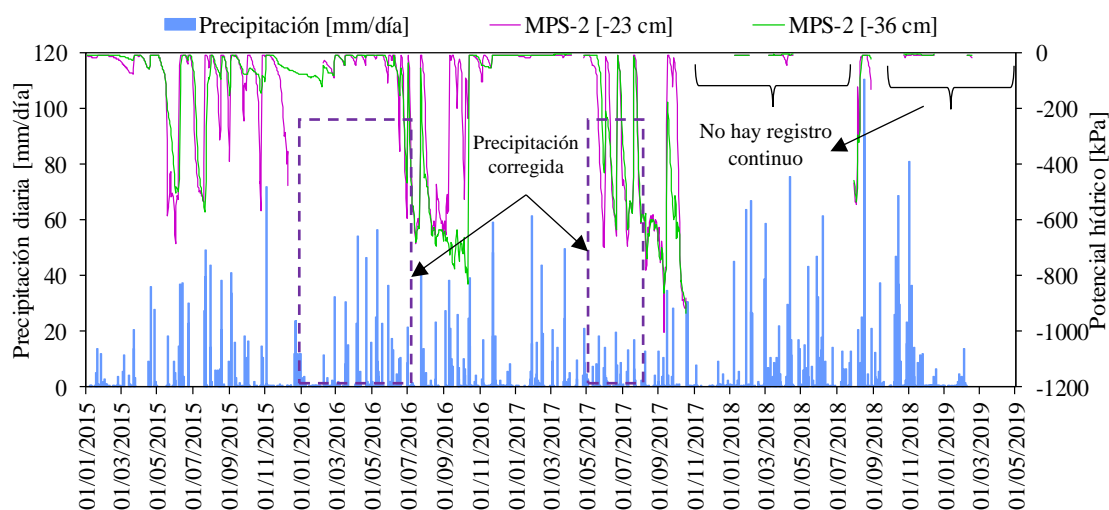


**Figura 43:** Registro de contenido volumétrico de agua (VWC) 2015 al 2019.

#### 4.3.4 Potencial hídrico (succión)

El sensor MPS-2 auscultado en la cabecera del deslizamiento a 23 y 36 cm de profundidad. Se registra datos de potencial hídrico y la temperatura del suelo. Es importante resaltar que, en el área de ingeniería comúnmente es usado el término de succión en lugar de potencial hídrico del suelo.

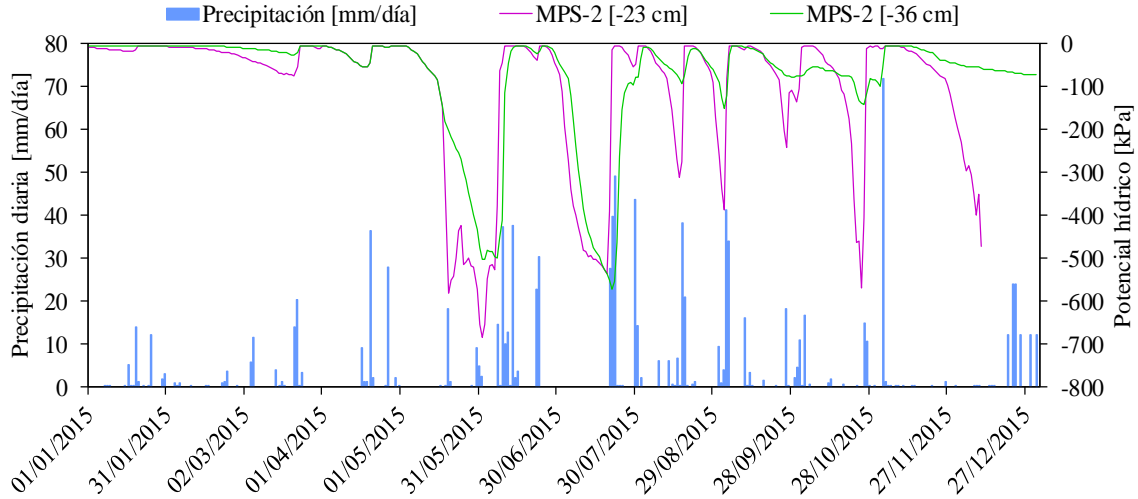
Los sensores de MPS-2 han sido auscultados desde primavera del 2013; sin embargo, en este trabajo solo se dispone los datos desde el 2015 a la actualidad. No obstante, en el año 2018 y 2019 no hay registro continuo de potencial hídrico; solo se registró el 10% en los dos años y el 90% no se registró debido al daño en el equipo. En la Figura 44 se aprecia las medidas de succión en relación con la precipitación pluvial; donde resulta que registran mayores valores de succión cuando la precipitación es baja, caso contrario las succiones son bajas menores de 50 kPa.



**Figura 44:** Registro de potencial hídrico desde enero del 2015 hasta finales de abril del 2019.

Para comprender el comportamiento de potencial hídrico respecto a la precipitación pluvial, solo nos centramos en el registro del 2015 presentado en la Figura 45; donde se puede deducir que, cuando presenta lluvias con intensidades mayores a 20 mm/día, se produce el proceso de infiltración y a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo la succión disminuye. En cambio, cuando no hay presencia de lluvia la succión incrementa alcanzando valores entre 600 a 700 kPa.

Los cambios de humedecimiento y secado del suelo se producen de forma rápida en la parte superficial, en este caso el sensor MPS-2 a 23 cm de profundidad, registra fluctuaciones en rangos amplios de succión; mientras, para el sensor MPS-2 que se encuentra a 36 cm de profundidad las fluctuaciones de succión son menores. Esta pequeña deferencia nos indica que a mayor profundidad el proceso de infiltración es menor debido a las lluvias de corta duración.



**Figura 45:** Registro de potencial hídrico de 2015.

#### 4.3.5 Curva de retención

La representación gráfica de curva de retención o curva característica es una relación entre la succión vs contenido volumétrico de agua (o succión-grado de saturación); en otras palabras, la curva de retención representa la capacidad de retener agua de un determinado suelo, bajo cierta succión aplicada. “La curva de retención es intrínseca de cada suelo y asociada directamente con la composición granulométrica, mineralógica y estructura del suelo” (Fredlund et al., 1993).

El objetivo más importante y aplicativo de la curva de retención, es obtener de una función no lineal las propiedades de suelo parcialmente saturado, tales como: zona capilar, zona de desaturación y la zona residual. Cabe resaltar, que los datos experimentales se ajustan al modelo de Van Genuchten (1980) el más usado y se expresa en la siguiente forma:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[ 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} ; \quad (27)$$

$$P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} ; \quad \Psi = P_g - P_l$$

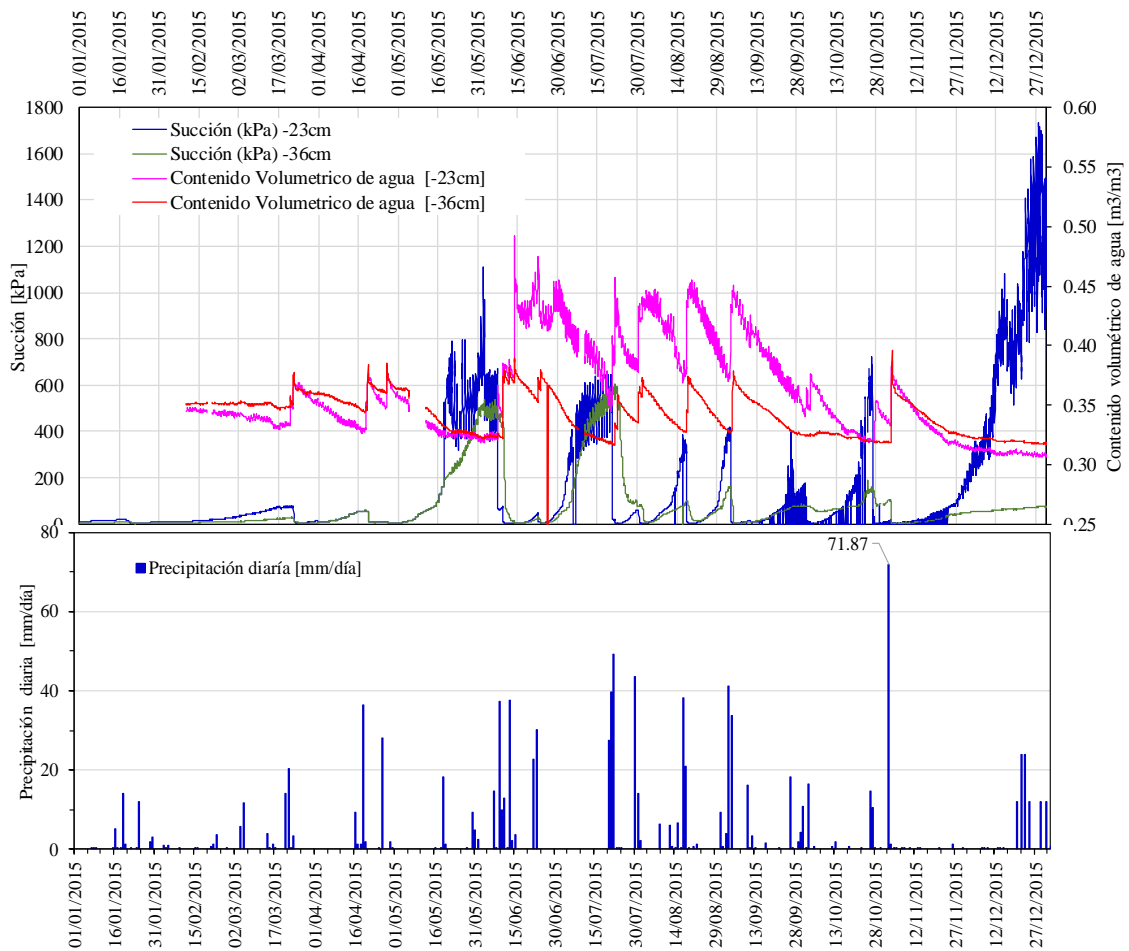
Donde:  $S_e$  es el grado de saturación efectiva;  $S_l$ , grado de saturación;  $S_{ls}$ , grado de saturación máxima;  $S_{rl}$ , grado de saturación residual;  $P_g$  es la presión de gas (aire);  $P_l$ , presión del líquido (agua); succión ( $\Psi$ ) = ( $P_g - P_l$ );  $\lambda$  y  $P$  son parámetros del modelo Van Genuchten;  $\sigma_0$  es la tensión superficial a la cual se midió  $P_0$ . ( $\sigma_0=0.072$  N/m a 20°C);  $\sigma$  es la tensión superficial del líquido y  $P_0$  es la presión inicial de desaturación.

En este estudio se ha obtenido la curva de retención a partir de datos medidos in-situ en la cabecera del deslizamiento (Cercs). Las medidas obtenidas a partir de sensores auscultados como el MPS-2 para la succión y 10HS para el contenido volumétrico de agua; la profundidad en la que se midieron fue a 23 y 36 cm respectivamente. La curva de retención solo se ha dibujado con los registros del 2015, mientras que los registros de succión en el año 2016 y 2017 no muestran buenos resultados y no hay registro continuo de succión en el año 2018.

En la Figura 46 se puede apreciar el comportamiento de succión y contenido volumétrico de agua (VWC) respecto a la precipitación; es decir cuando existe lluvias diarias se ve notablemente que

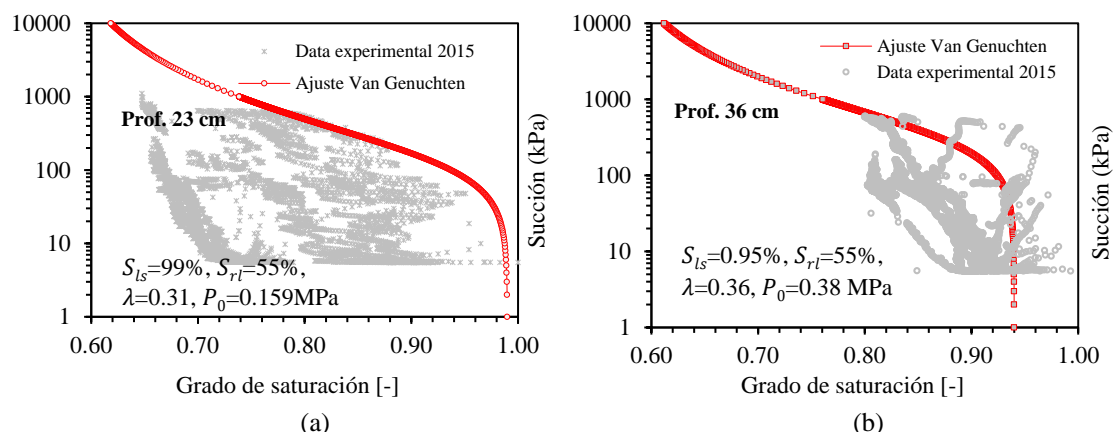
la succión disminuye menor a 50 kPa; mientras el VWC aumenta en orden de  $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . En cambio, cuando no hay presencia de lluvia la succión aumenta y el VWC disminuye. Estos cambios en la gráfica de curva de retención del suelo muestran el proceso de mojado y secado conocido como el fenómeno de histéresis.

El sensor que se dispone a 23 cm de profundidad registra valores mayores de succión y VWC, que el sensor situado a 36 cm de profundidad. Esto nos indica que cuando más cerca se encuentra a la superficie influye notablemente los efectos atmosféricos tales como: la precipitación, cambios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la radiación solar, entre otros. Se puede concluir que a mayor profundidad los cambios son menores ante efectos atmosféricos.



**Figura 46:** (a) Comportamiento de succión respecto al contenido volumétrico de agua. (b) Precipitaciones pluviales.

Para graficar la curva de retención se ha utilizado los datos de contenido volumétrico de agua VWC y la succión. El contenido volumétrico de agua se ha transformado a grado de saturación, dividiendo los valores de VWC entre el límite superior de contenido volumétrico de agua, este valor es considerado como la porosidad (0.492), cuando todo el medio poroso se encuentra ocupado por la fase líquida (agua).



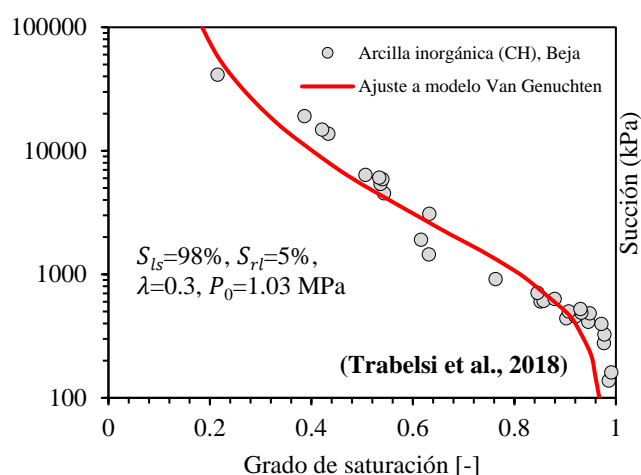
**Figura 47:** (a) Curva de retención para coluvial y (b) Curva de retención para argilita alterada.

En la Figura 47(a) se presenta la curva de retención para coluvial a 23 cm de profundidad respecto a la superficie. Este material está conformado por arcilla inorgánica (CL) de baja plasticidad; contenido de finos 75%, índice de plasticidad 15%, límite líquido 30.7% y límite plástico de 15.8%. Para obtener los parámetros de curva de retención se ha dibujado los datos de campo (succión vs grado de saturación), en la cual resulta procesos de humectación y secado. Para este trabajo se ha tomado el criterio de aproximar el modelo de Van Genuchten (1980) al proceso de secado. Los parámetros estimados del modelo Van Genuchten son: saturación residual 55%, saturación máxima de 99%,  $\lambda=0.31$ ,  $P_0=0.159$  MPa y la presión de entrada de aire 0.07 MPa.

La Figura 47(b) presenta la curva de retención para argilita alterada ubicada a 36 cm de profundidad, el material que conforma es arcilla inorgánica (CL) de plasticidad baja, contenido de finos 85%, índice de plasticidad 17.6, límite líquido 37.4% y límite plástico 19.8%. También, se aproximó al modelo Van Genuchten en el proceso de secado. Los parámetros estimados del modelo son: el grado de saturación residual 55%, saturación máxima 95%,  $\lambda=0.36$ ,  $P_0=0.380$  MPa y la entrada de presión de aire 0.105 MPa.

Por un lado, en la capa de argilita inalterada no se tienen medidas de succión y contenido volumétrico de agua in-situ, por ende, se ha tomado en cuenta los valores de una arcilla muy similar de un trabajo de “Evaporación, contracción y permeabilidad intrínseca de arcilla no saturada” realizado por Trabelsi, Hadrach y Gruiras (2018). Trabelsi estudió el suelo arcilloso de Beja que se encuentra al Nor-Este de Túnez, cuya distribución granulométrica indica 85% de finos, el índice de plasticidad 32%, límite líquido 62%, límite plástico 30%, límite de contracción 15%. Este suelo arcilloso fue clasificado como arcilla inorgánica (CH) de alta plasticidad. Cabe destacar, que la argilita inalterada de Cercs tiene parámetros similares a la arcilla de Beja como: la granulometría, contenido de finos mayor a 85%, índice plasticidad 29.2%, límite líquido 53.1%, límite plástico 23.9% y está clasificada como arcilla inorgánica (CH) de alta plasticidad. Por lo tanto, los parámetros de curva de retención para argilita inalterada se consideran del trabajo de Trabelsi, Hadrach y Gruiras (2018).

La curva de retención para la arcilla de Beja fue obtenida mediante dos técnicas (tensiómetro y psicrómetro) para medir la succión y el estado de equilibrio de humedad. La curva de retención obtenida en la trayectoria de secado fue ajustada al modelo de Van Genuchten (1980), y los parámetros del modelo son: grado de saturación residual 5%, saturación máxima 98%,  $\lambda=0.3$  y  $P_0=1.03$  MPa. La entrada de aire a 0.45 MPa (Trabelsi et al., 2018). En la Figura 48 se aprecia la curva retención de la arcilla inorgánica (CH).



**Figura 48:** Curva de retención para argilita inalterada, asumida del trabajo de Trabelsi (2018).

En la Tabla 29, se resume los parámetros de curva de retención estimados a partir de datos experimentales ajustados al modelo Van Genuchten (1980) para cada estrato. Estos valores se ingresan para el modelo termo-hidráulico en Code\_Bright.

**Tabla 29:** Parámetros de curva de retención estimados con el modelo Van Genuchten.

Estrato	$P_0$ MPa	$\sigma_0$ [N/m]	$\lambda$ [-]	$S_{rl}$ [-]	$S_{ls}$ [-]
Coluvial	0.159	0.072	0.31	0.55	0.99
Argilita alterada	0.380	0.072	0.36	0.55	0.95
Argilita inalterada [*]	1.030	0.072	0.30	0.05	0.98

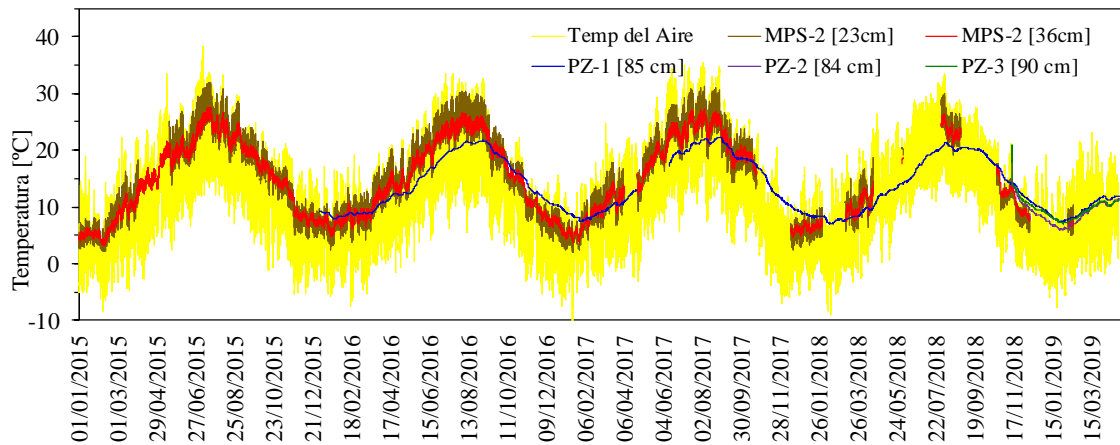
Nota: [\*] Corresponde a la arcilla inorgánica (CH) de alta plasticidad de Beja (Trabelsi et al., 2018).

#### 4.3.6 Temperatura del aire y en el terreno

El registro de la temperatura del aire se ha realizado con el sensor de Campbell Scientific HC2S3. Mientras, el registro de temperatura del suelo ha sido medido con los sensores MPS-2 (23 y 36 cm de profundidad) y piezómetros (84, 85 y 90 cm de profundidad). La medición de la temperatura con HC2S3 y MPS-2 se tiene el registro desde el año 2015 a la actualidad (2019), aunque en el 2018 y 2019 el sensor MPS-2 no tiene medidas continuas como se puede apreciar en la Figura 49.

En el piezómetro PZ-1 se tiene los registros de temperatura desde el 2016 a la actualidad; mientras PZ-2 y PZ-3 han sido auscultados recientemente en noviembre del 2018. Cuyas medidas se encuentran expresadas en la Figura 49.

Se puede concluir que la temperatura del aire y suelo tiene dos picos importantes la máxima en el verano y la mínima en el invierno. Pero, las medidas de temperatura a profundidades de 0.85 a 0.90 m los picos máximos se reducen en 7-10°C y el pico mínimo aumenta en 5-7°C respecto a la temperatura del aire. Además, en la profundidad la temperatura es más estable con menor fluctuación en intervalos de tiempos cortos.



**Figura 49:** Registro de temperatura del suelo y temperatura del aire en color amarillo.

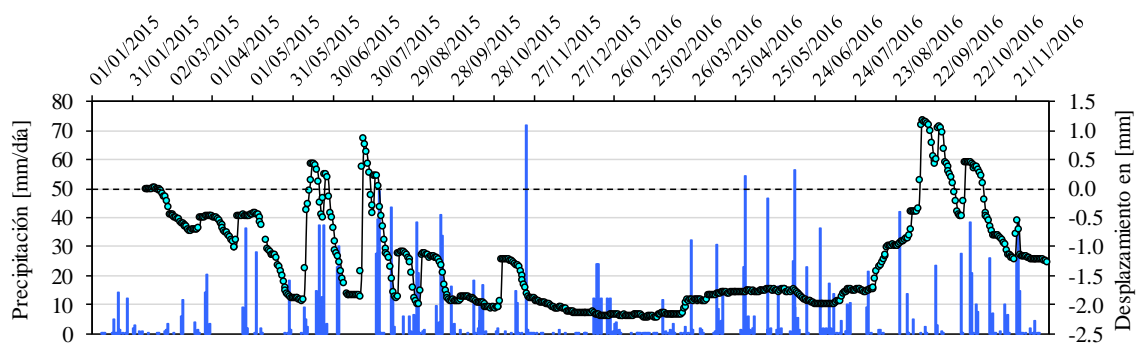
#### 4.3.7 Medidas de extensómetro

El equipo WS/POSIWIRE “Position Sensors” de ASM WS12-3000, también se llama extensómetro horizontal. Este equipo es auscultado con el objetivo de medir el desplazamiento acumulado en la cabecera del deslizamiento, donde se encuentra el escarpe principal.

La auscultación fue realizada en primavera del 2013; sin embargo, para este trabajo se ha recopilado los registros desde el 2015 al 2019; de los cuales, no se ha registrado datos desde 01 de junio al 16 de noviembre del 2018. Debido a que fue retirado el equipo de la zona de estudio con el objetivo de calibrar y hacer el mantenimiento respectivo.

Durante la calibración del extensómetro en laboratorio, se ha encontrado una relación que existe entre voltaje vs desplazamiento y mediante una regresión lineal se ha obtenido la ecuación para determinar el desplazamiento acumulado. A continuación, se describe los desplazamientos:

En la Figura 50 se presenta el registro de desplazamiento vs tiempo desde 2015 y 2016, en el cual se puede observar que, en su mayoría el desplazamiento acumulado se han atenuado en -2.0 mm, cuando la precipitación disminuye, caso contrario el desplazamiento máximo registrado es de 1.00 mm. Por lo tanto, se puede concluir que el desplazamiento de 1.00 mm en dos años es imperceptible y la masa de coluvión deslizada se encuentra estable sin movimiento significativo.



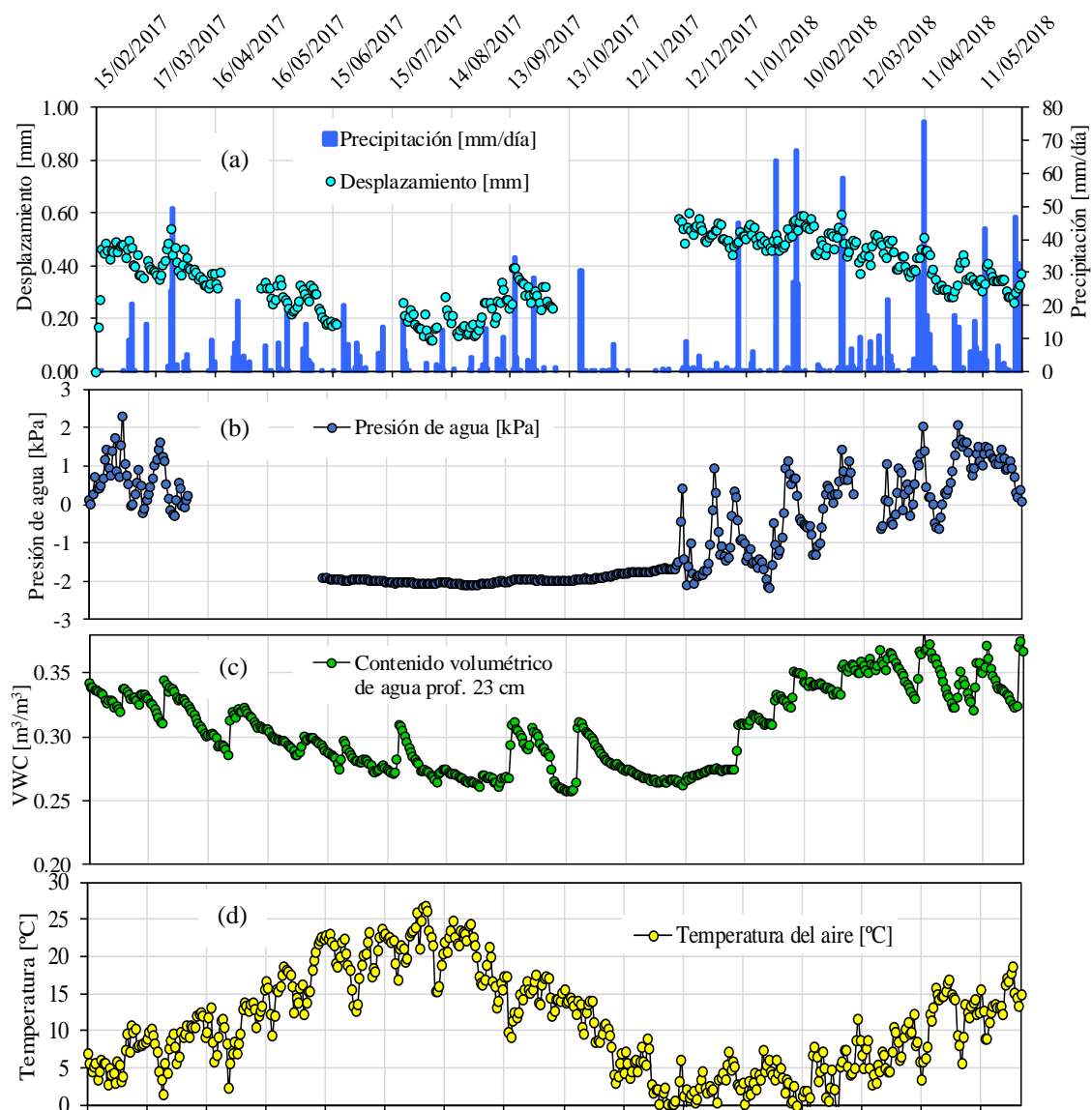
**Figura 50:** Desplazamiento registrado con extensómetro y comparado con la precipitación.

En la Figura 51 se presenta el registro de desplazamiento acumulado vs el tiempo desde febrero del 2017 al 30 de mayo del 2018. En el cual, los desplazamientos son menores a 0.60 mm en 16 meses, estos desplazamientos son imperceptibles y por tanto se confirma que no hay movimiento en la masa de coluvión.



Para entender la atenuación e incremento de desplazamientos se ha comparado con otros factores como la presión de agua, contenido volumétrico de agua, temperatura del aire y precipitación, presentada en la Figura 51 (a, b, c y d). La atenuación se da cuando el suelo entra en proceso de secado. Es decir, cuando la temperatura aumenta y la precipitación disminuye, el suelo pierde el contenido de agua, esto ocurre desde febrero hasta mediados de agosto del 2017 y 2018.

Por otra parte, el incremento del deslizamiento se da cuando el suelo entra en proceso de humedecimiento; es decir, cuando aumenta la precipitación y disminuye la temperatura; debido a estos cambios en el terreno aumenta la presión de agua y contenido volumétrico de agua. Este proceso ocurre desde agosto a diciembre del 2017 y 2018. Como se puede ver en la Figura 51 (a, b, c y d).



**Figura 51:** Desplazamiento registrado con extensómetro y comparado con registro de otros instrumentos. (a) Relación entre desplazamiento-precipitación diaria. (b) Presión de agua medida con piezómetro. (c) Contenido volumétrico de agua medida con sensor 10HS y (d) Temperatura del aire.

## 5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE

### 5.1 Introducción

Existen varias metodologías para el cálculo de estabilidad de taludes, el cual depende del objetivo de análisis y de los resultados que se desean obtener. Las herramientas disponibles para el cálculo de estabilidad más comunes son: tablas o ábacos, análisis gráficos, cálculos manuales, hojas de cálculo y software. Éste último es capaz de resolver problemas complejos y de forma eficiente.

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de equilibrio límite, métodos numéricos y métodos dinámicos. Los métodos numéricos son técnicas que muestran mejor aproximación del comportamiento de estabilidad; sin embargo, los métodos de equilibrio límite son más sencillos de utilizar y permiten analizar el deslizamiento traslacional y rotacional.

#### 5.1.1 Principios de equilibrio límite

Todos los métodos de equilibrio límite emplean la expresión de Mohr-Coulomb para determinar la resistencia al corte ( $\tau_f$ ) a lo largo de la falla. Según Janbú (1973) existe un estado de equilibrio límite cuando la tensión de corte movilizada ( $\tau$ ) es expresada como una fracción de resistencia al corte. La resistencia al corte es expresada por la relación lineal de Mohr-Coulomb, donde ( $\tau_f$ ) y ( $\tau$ ) son definidos por:

$$\text{La resistencia al corte (disponible): } \tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (28)$$

$$\text{Tensión de corte (movilizado): } \tau = \frac{\tau_f}{FS} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{FS} \quad (29)$$

Donde:  $c'$  cohesión y  $\phi'$  ángulo de fricción expresado en efectivas, y FS factor de seguridad. De la ecuación (29) se obtiene el FS en relación de ( $\tau_f$ ) y ( $\tau$ ).

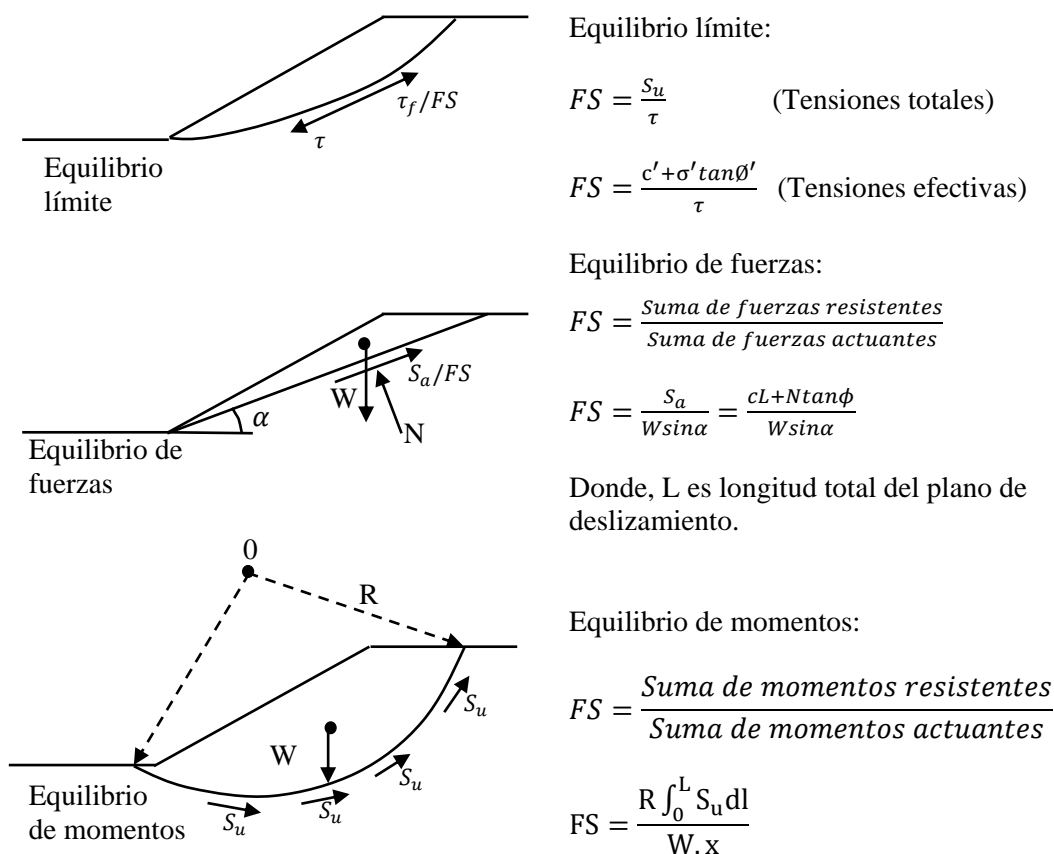
El factor de seguridad FS, es el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones reales que presenta una ladera o talud, y las condiciones que lleva a su rotura. Según Días (2009) indica que el FS es empleado para conocer el factor de amenaza para que falle un talud en las peores condiciones.

También, el FS se puede definir de tres maneras: equilibrio límite, equilibrio de fuerzas y equilibrio de momentos (Abramson et al., 2002). Estas definiciones se ilustran en la Figura 52.

Otro criterio es dividir la masa en rebanadas (dovelas) y considerar el equilibrio de cada rebanada por separado, posteriormente se suma para obtener el factor de seguridad global. Esta expresión viene dada de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\int \tau_R \cdot ds}{\int \tau \cdot ds} \quad (30)$$

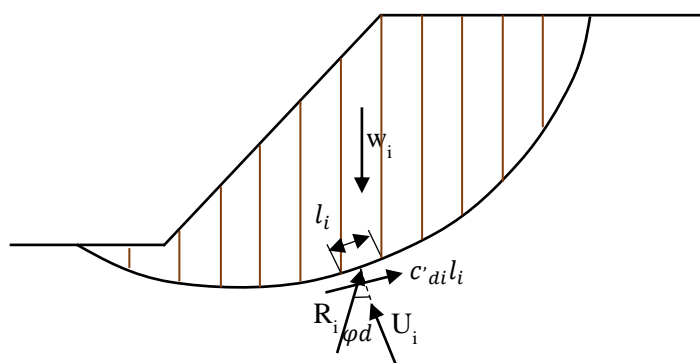
Donde:  $\tau_R$  es la resistencia al corte máximo que se puede movilizar,  $\tau$  es la resistencia al corte movilizado,  $ds$  es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie del deslizamiento. Si el FS es menor a 1.0, es inestable.



**Figura 52:** Definición de varios factores de seguridad (Abramson et al., 2002).

El método de rebanada se utiliza para mejorar la precisión de equilibrio global. Y consiste en dividir la masa deslizada en distintas secciones verticales (ver Figura 53.), a efecto de cálculo, formando una serie de rebanadas que se consideran como sólido rígido o bloques; por lo tanto, deben satisfacer cada una, todas las condiciones de equilibrio (Alonso, 2005). Además, el autor señala que en la práctica común las rebanadas no pueden ser menores de 10 a 15 bloques.

Una de las ventajas del método de las rebanadas es lograr una mejor aproximación de distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de falla. Esta distribución estará muy condicionada por la altura del terreno en cada rebanada (Alonso, 2005).



**Figura 53:** División en rebanadas a fin de aplicar el método de equilibrio límite (Alonso, 2005).

### 5.1.2 Método de equilibrio límite

El método de equilibrio límite es el más utilizado en la práctica común para el análisis de estabilidad de taludes o laderas naturales con buena aproximación al valor real. Fellenius (1936) introdujo el primer método denominado método ordinario para superficies de falla circular. Bishop (1955) introduce una nueva relación de fuerza normal para el cálculo de FS. También, Janbú (1954) desarrolló un método simplificado para superficies de falla no circulares, dividiendo la masa deslizante en rebanadas. Más tarde, Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) y varios otros hicieron contribuciones con diferentes hipótesis para el cálculo de FS.

En la Tabla 30, se resume todos los métodos de equilibrio límite y se basan en el método de las rebanadas bajo dos hipótesis: 1) puede existir o no una fuerza lateral (E) y 2) una fuerza cortante (T). La diferencia básica entre los métodos es como se determinan estas fuerzas.

**Tabla 30:** Resumen de los métodos de equilibrio límite.

Método	Equilibrio de fuerza	Superficie		Equilibrio de fuerzas		Equilibrio de momentos	Hipótesis contacto entre rebanadas
		Cir.	No cir	Hz.	V.		
Ordinario.	NO	SI	NO	NO	NO	SI	No toma en cuenta E y T.
Bishop simplificado	**	SI	*	NO	SI	SI	Considera Y, pero no el T.
Bishop riguroso	SI	SI	*	SI	SI	SI	Considera E y T.
Janbú simplificado	SI	*	SI	SI	SI	NO	Considera E pero no el T.
Janbú generalizado	SI	SI	SI	SI	NO	NO	Considera E y T.
Lower-Karafiath	SI	NO	SI	SI	SI	NO	Considera inclinación resultante de fuerzas $\phi = (\alpha + \beta)/2$
Corps of Engineers	SI	NO	SI	SI	SI	NO	Considera inclinación resultante de fuerzas $\phi = (\alpha_2 + \beta_2)/2$
Spencer	SI	SI	*	SI	SI	SI	Asume $T = E \tan \theta$
Morgenstern-Price	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Definido por f(x): $T = f(x) \cdot \lambda \cdot E$

Nota: Hz = horizontal, V = vertical, Cir = circular

(\*) Se puede utilizar para superficies de falla tanto circulares como no circulares.

(\*\*) Satisface el equilibrio de la fuerza vertical para determinar la fuerza normal (N') de la base.

Fuente: Resumido a partir de (Abramson et al., 2002 y Nash, 1987).

#### ***El método Ordinario (Fellenius, 1936)***

El método ordinario (MO) es uno de los procedimientos más simples para calcular el FS, ya que la ecuación no requiere un proceso de iteración. Este método satisface el equilibrio de momentos para superficies de falla circular e ignora las fuerzas de corte entre rebanadas (normales y tangenciales).

$$FS = \frac{\sum (c'l + N' \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad ; \quad N' = (W \cos \alpha - u) \quad (31)$$

Donde, u es la presión de agua, l es longitud de la base de corte,  $\alpha$  superficie de inclinación del deslizamiento y W es el peso.

#### ***Método de Bishop (Bishop, 1959).***

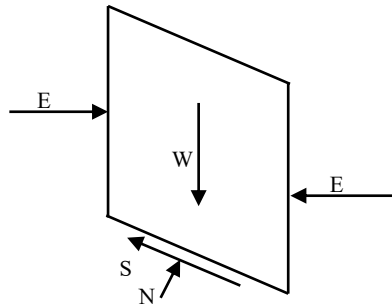
El método Bishop simplificado (MSB) es muy común en la práctica para superficies de falla circular, este método satisface el equilibrio de momentos respecto del centro de la superficie de falla y el equilibrio de fuerzas en la dirección vertical. Pero, asume que las fuerzas de corte entre

rebanas son nulas (esto reduce el número de incógnitas en n-1). Y está dado por la siguiente expresión.

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum \left( W - \frac{c'l \sin \alpha}{FS} - ul \cos \alpha \right) \quad (32)$$

$$m_\alpha = \cos \alpha \left( 1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{FS} \right) \quad (33)$$

Para el cálculo requiere un proceso iterativo debido a la relación no lineal ya que el FS aparece en ambos lados. Por un lado, el método riguroso de Bishop considera las fuerzas de corte (T) y fuerzas normales (E) entre rebanadas. Además, asume una distribución de fuerzas resultantes y satisface el equilibrio de momentos de cada corte, es decir las fuerzas entre rebanadas T y E, por lo tanto, también requieren un proceso iterativo para encontrar el FS.



**Figura 54:** Diagrama de fuerzas para una rebanada usando el método de Janbú generalizado.

#### **Método de Janbú**

La aplicación de este método es muy común en el análisis de estabilidad como el método simplificado, método generalizado y el método directo, desarrollado por Janbú (1973).

*Método simplificado de Janbú.* - Se basa en la superficie de falla compuesta (es decir, no circular) y el FS es determinado por el equilibrio de la fuerza horizontal al igual que MSB, este método no satisface el equilibrio de momento. Pero si considera las fuerzas normales entre rebanadas (E), pero no toma en cuenta las fuerzas de corte (T), la fuerza normal (N) se determina de la misma manera que MSB y el FS se calcula mediante la siguiente expresión (Janbú, 1973).

$$F_f = \frac{\sum (c' + (N - u) \tan \phi') \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha + \sum \Delta E} \quad (34)$$

Donde,  $\sum \Delta E = E_2 - E_1$ , fuerzas normales netas (cero si no hay fuerza horizontal).

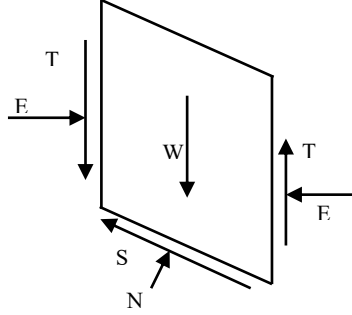
$$F_0 = \frac{\sum \left\{ \frac{b(c' + (p - u) \tan \phi')}{n_\alpha} \right\}}{\sum p b \tan \alpha} \quad ; \quad n_\alpha = \cos^2 \alpha \left( 1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{FS} \right) \quad (35)$$

Donde,  $p = W/b$ . W total de fuerza vertical y b es el ancho de la rebanada.

También, Janbú introdujo un factor de corrección ( $f_0$ ) al FS original ( $F_0$ ), para incluir el efecto de las fuerzas entre rebanadas. El factor de corrección ( $f_0$ ) depende de la profundidad y longitud de radio (d/L). De tal manera, el método modificado de Janbú se obtiene de la siguiente ecuación.

$$F_f = f_0 * F_0 \quad (36)$$

**Método de Janbú generalizado (MJG).** – es un método que satisface el equilibrio de fuerzas y el momento. La fuerza normal en la base se convierte en una función de la fuerza cortante entre rebanadas (Nash, 1987). Este método considera las fuerzas horizontales E y fuerzas cortantes T entre rebanadas. Como se aprecia en la Figura 55 y la ecuación 37 para determinar el FS en superficies de fallas y geometrías complejas.



**Figura 55:** Diagrama de fuerzas para una rebanada usando el método de Bishop simplificado.

$$F_f = \frac{\sum[\{c'l + (N - ul)\tan\phi'\}\sec\alpha]}{\sum\{W - (T_2 - T_1)\}\tan\alpha + \sum(E_2 - E_1)} \quad (37)$$

Donde, la fuerza normal (N) y fuerzas de corte (T) se obtienen con las siguientes ecuaciones

$$N = \frac{1}{m_\alpha} \left\{ W - (T_2 - T_1) - \frac{1}{F} (c'l - ul * \tan\phi') \sin\alpha \right\} \quad (38)$$

$$T = \tan\alpha_t E - \frac{dE}{dx} h_t \quad (39)$$

Donde,  $\tan\alpha_t$  es la pendiente de la línea de empuje,  $h_t$  altura desde el punto medio de la base de corte de dE.

#### **Método de Lowe & Karafiath**

Este método “*Lowe -Karafiath method*” se desarrolló en (1960) y únicamente satisface el equilibrio de fuerzas para el cálculo de FS. Además, se supone que las fuerzas entre rebanadas están inclinadas a un ángulo igual (ángulo de la superficie del terreno más el ángulo de la base de la rebanada) ésta dividida entre dos. Es decir  $\phi = (\alpha + \beta)/2$ . Donde  $\phi$  es la inclinación de la fuerza resultante de rebanada.

$$T = E \tan\phi \quad (40)$$

Este método también satisface el equilibrio de fuerzas en las direcciones horizontal y vertical (Aryal, 2006).

#### **Método de Corps of Engineers I y II**

El método de “*Corps of Engineers I*” se desarrolló en (1970) es similar al método “*Lowe & Karafiath method*”, excepto que las fuerzas entre rebanadas están inclinadas a un ángulo igual al ángulo de la superficie del terreno, es decir  $\theta = \beta$ , donde  $\beta$  es el ángulo de la pendiente.



Este método asume que el equilibrio de fuerzas satisface en la dirección horizontal y vertical. Por un lado, la solución resulta sobre dimensionada; el equilibrio de momentos respecto del centro de la superficie de rotura no se satisface completamente (Aryal, 2006).

El método de “*Corps of Engineers II*” supone que, las fuerzas entre rebanadas están inclinadas a un ángulo igual al ángulo promedio de las tangentes de los puntos límites derecho e izquierdo de la superficie de rotura.

Además, satisfacen el equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal y vertical. Al igual que el anterior método, la solución resulta sobre dimensionada; el equilibrio de momentos respecto del centro de la superficie de rotura no se satisface completamente.

#### ***Método de Morgenstern-Price***

El método de Morgenstern-Price (MMP) satisface el equilibrio de fuerza y de momentos, y asume la función de fuerzas entre rebanadas. También, presume que la inclinación de las fuerzas entre rebanadas puede variar de acuerdo a una función arbitraria ( $f(x)$ ) como se expresa en la ecuación 42. Este método es considerado más preciso aplicado a superficies de falla circular y no circular (Price y Morgenstern, 1965).

$$T = f(x) \cdot \lambda \cdot E \quad (41)$$

Donde; E, fuerza normal entre rebanadas;  $f(x)$ , función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y  $\lambda$  es un valor escala. Para una función dada  $f(x)$ , los valores de  $\lambda$  y F se encuentran de forma que cumplan los equilibrios globales, momentos y fuerzas, de esta forma  $F=F_f=F_m$ .

$$F_f = \frac{\sum [c'l + (N - ul)\tan\phi'] \sec\alpha}{\sum \{W - (T_2 - T_1)\} \tan\alpha + \sum (E_2 - E_1)} \quad (42)$$

$$F_m = \frac{\sum (c'l + (N - ul)\tan\phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (43)$$

#### ***Método de Spencer***

El método Spencer (MS) es el mismo que el método Morgenstern-Price, excepto la suposición hecha en las fuerzas entre rebanadas. Una inclinación constante es asumida para fuerzas entre rebanadas y el FS es calculado para ambos equilibrios (Spencer, 1967). Según este método la fuerza cortante entre rebanada se define como:

$$T = E \tan\phi \quad (44)$$

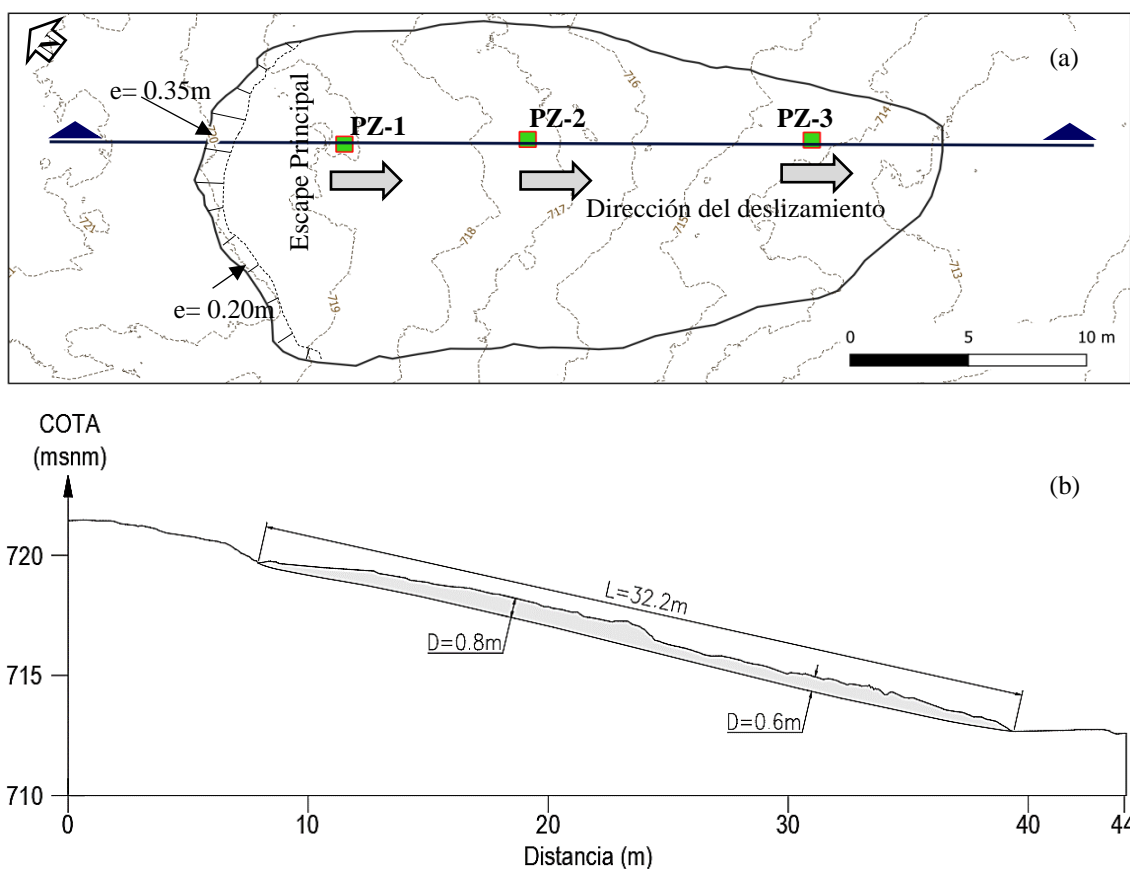
## 5.2 Análisis de estabilidad del deslizamiento existente en Cercs

Para evaluar la condición de estabilidad del deslizamiento existente en Cercs, se ha utilizado el software Slide 8.0 (Rocscience Inc, 2018). Este software analiza mediante el equilibrio límite y dispone de varios métodos de análisis por rebanadas para obtener el factor de seguridad (FS). En este trabajo se analiza mediante cuatro métodos más usados como: Bishop simplificado, Janbú simplificado, Spencer y Morgenstern-Price. Estos métodos satisfacen a cualquier tipo de superficie de rotura circular y no circular. En este trabajo se analiza una superficie de rotura no circular de tipo traslacional.

### 5.2.1 Descripción del deslizamiento existente en Cercs

El deslizamiento de Cercs está situado en una ladera con baja pendiente que varía de 10 a 15° y la dirección del deslizamiento tiene 135° de azimut. La superficie de rotura se encuentra entre 0.6 a 0.8 m de profundidad respecto a la superficie del terreno. El ancho máximo de la masa deslizada es de 15 m y la longitud máxima 32.2 m en dirección del deslizamiento; como se aprecia en la Figura 56(a). Por un lado, en la cabecera del deslizamiento existe un escarpe principal con saltos de 0.20 y 0.35 m.

El deslizamiento superficial existente en Cercs es clasificado de tipo traslacional de acuerdo al criterio de Skempton y Hutchison (1969). Este criterio consiste en una relación entre el espesor (D) y la longitud máxima de superficie de rotura (L), el resultante debe ser menor a 0.10 en unidades adimensionales. Para el deslizamiento de Cercs la relación entre D/L es igual a 0.025.



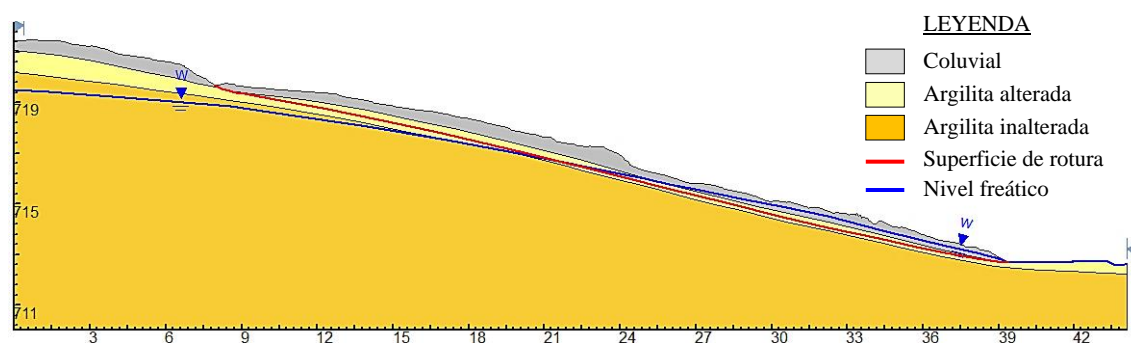
**Figura 56:** Deslizamiento existente en Cercs. (a) Vista en planta y (b) Perfil longitudinal.

### 5.2.2 Definición de la geometría para el análisis

La geometría del modelo comprende de varias entidades como: el perfil topográfico, capas de los estratos, nivel freático y la superficie de rotura existente como se visualiza en la Figura 57. Para ello, primero se generó el perfil topográfico en software QGIS a partir de un modelo digital de elevaciones DEM. En seguida, el perfil topográfico fue exportado a AutoCad; en el cual, se ha creado el modelo geológico a partir de tres sondeos (PZ-1, PZ-2 y PZ-3); también, se ha definido el nivel freático de acuerdo a lecturas piezométricas. Posteriormente, se ha exportado en formato DXF y finalmente fue importado al software Slide de versión 8.0 de Rocsciense. Es importante que cada entidad geométrica tenga un nombre específico como se detalla en la Tabla 31.

**Tabla 31:** Asignación de entidades para importar de Autocad a Slide.

AutoCad Nombre de la capa	Slide Objeto en Slide	Comentario
EXTERNAL	Límite externo	Línea/Polilínea cerrada.
MATERIAL	Contacto entre materiales	Línea/Polilínea
WATER_TABLE	Nivel freático.	Línea/Polilínea
NONCIRC_SURFACE	Superficie de falla no circular	Línea/Polilínea
PIEZO	Límite de la línea piezométrica	Línea/Polilínea



**Figura 57:** Definición del modelo geológico en Slide 8.0 para el análisis de estabilidad.

### 5.2.3 Propiedades de los materiales

Para el análisis estabilidad mediante la ecuación de Mohr Coulomb es necesario definir los parámetros mecánicos como la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, éstas se consideran como las propiedades intrínsecas de cada material. Estos parámetros se han obtenido a partir de los ensayos de laboratorio, descritos con detalle en el ítem 3.3.

Por un lado, en el perfil longitudinal del deslizamiento se ha definido tres capas: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. El coluvial se encuentra en la parte superficial cuyo espesor varía entre 0.4 a 0.5 m; posteriormente, seguido por la capa delgada de argilita alterada con espesor que varía entre 0.4 a 0.60 m; después seguido por la argilita inalterada y su contacto de esta última capa se desconoce. Cada una de las capas ha sido caracterizada mediante ensayos de laboratorio y complementadas con estudios anteriores. En la Tabla 32 se presenta los valores utilizados para el análisis de estabilidad en Slide 8.

**Tabla 32:** Resumen de parámetros resistentes del terreno.

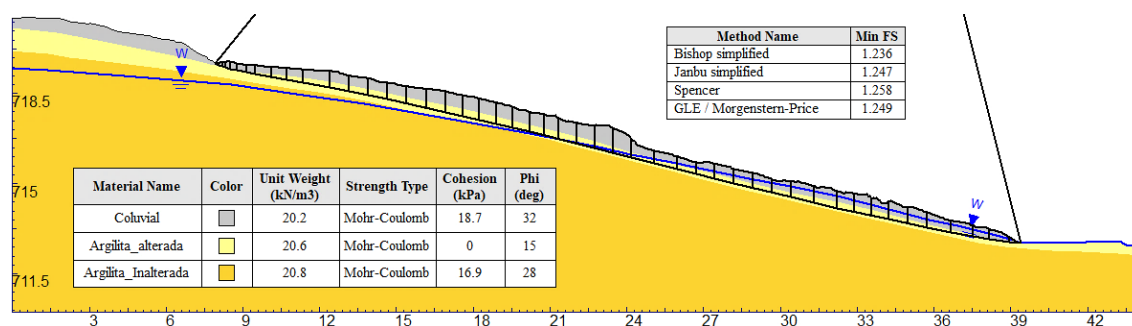
Estrato	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión [c] kPa	Angulo de fricción [Ø] grados	Comentario
Coluvial	20.2	18.7	32	Material deslizado espesor varia de 0.40 a 0.60 metros.
Argilita alterada	20.6	0	15	En este estrato se encuentra la superficie de deslizamiento.
Argilita inalterada	20.8	16.9	28	Estrato intacto. Sobre esta capa existe el deslizamiento.

## 5.2.4 Análisis de estabilidad en condición actual

Para el análisis de estabilidad se ha considerado cinco hipótesis: 1) determinar el factor de seguridad por el método de rebanadas; 2) el criterio de rotura Mohr-Coulomb para las tres capas (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada); 3) se ha asumido 50 rebanadas a lo largo de la superficie de rotura; 4) tipo de superficie No-Circular definida mediante tres sondeos manuales y 5) el nivel freático fue definido mediante los registros de presión de agua en piezómetros auscultados.

El nivel freático se ha dibujado con los últimos registros del mes de abril del 2019 en los tres piezómetros de cuerda vibrante. Para PZ-1 la presión de agua es de -2 kPa; para PZ-2 la presión de agua es 0 kPa y para el PZ-3 la presión de agua es 8.0 kPa. Estos valores de presión de agua parecen representar el valor medio comparando con el registro completo.

El deslizamiento superficial existente de Cercs, indica que su estabilidad en condición actual se encuentra estable con FS de 1.24 en condiciones estáticas como se aprecia en la Figura 58. Por un lado, los resultados de desplazamientos registrados con extensómetro horizontal entre 2015, 2016, 2017 y 2018 no dieron desplazamientos considerables, por ello, se concluye que el deslizamiento de Cercs es estable.



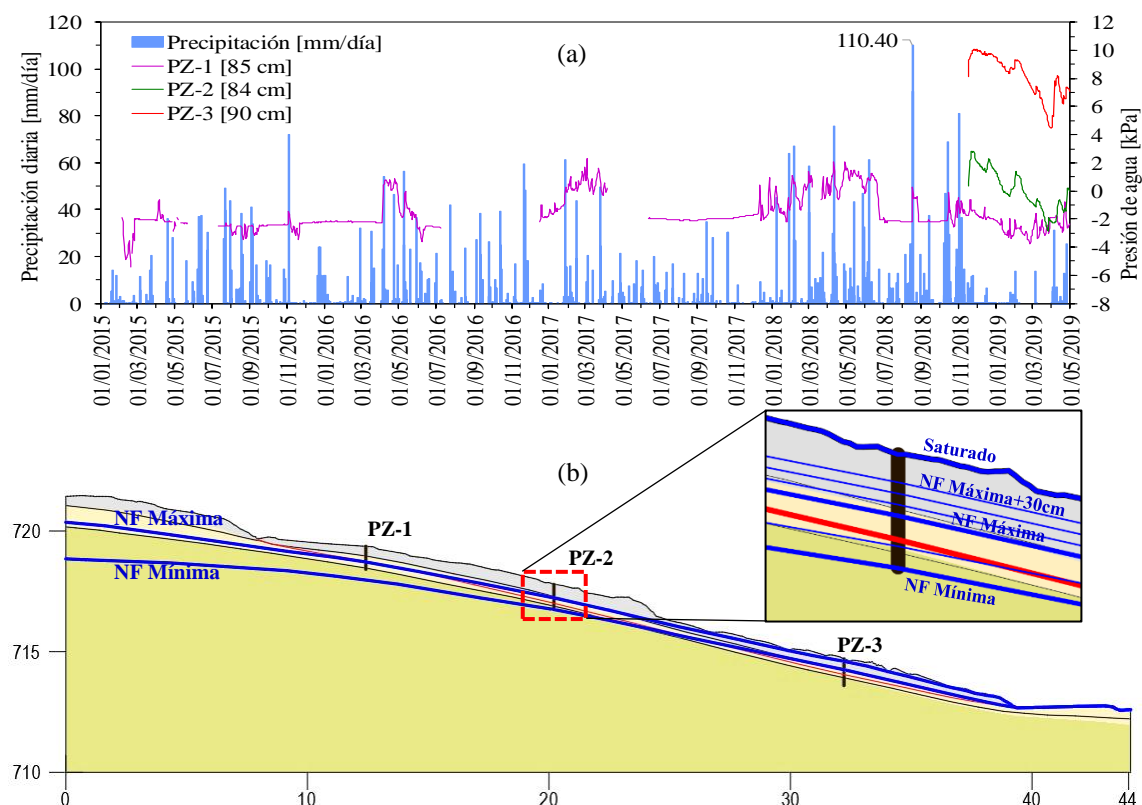
**Figura 58:** Factor de seguridad en condición actual en el deslizamiento existente de Cercs.

## 5.2.5 Análisis de estabilidad de acuerdo a la variación de nivel freático

En el piezómetro PZ-1 el registro de presión de líquido o presión de agua se ha considerado desde enero del 2015 hasta abril del 2019, durante este período varía desde -5.40 a 2.30 kPa respectivamente (mínimo y máximo). Donde, la presión de líquido fue convertida a columna de agua para definir la superficie de agua en el modelo.

Por un lado, para los piezómetros PZ-2 y PZ-3 se tiene el registro de presión de líquido desde noviembre del 2018 hasta abril del 2019; en el cual, el piezómetro PZ-2 la presión de agua varía

desde -2.87 a 2.83 kPa; mientras para el piezómetro PZ-3 la presión de agua varía desde 4.43 a 10.00 kPa. En la Figura 59(a) se presenta la variación de presión de agua.



**Figura 59:** (a) Registro de presión de líquido en piezómetros. (b) Definición de nivel freático (NF) mínimo y máximo, incrementos de NF por encima de nivel freático máximo y saturación del terreno.

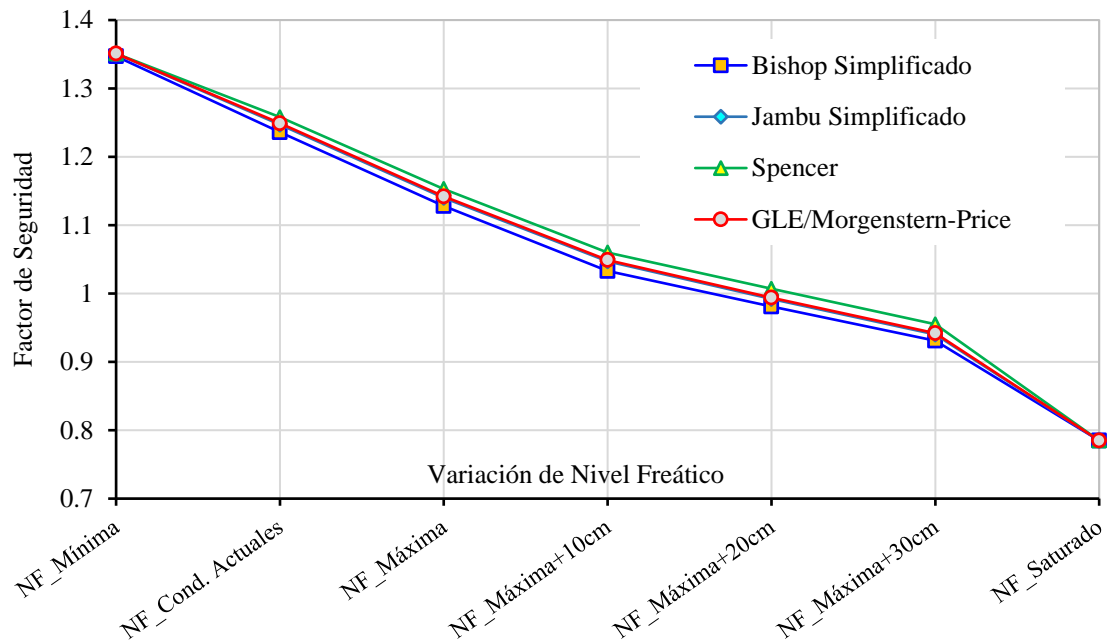
Mediante los registros de piezometría se ha definido el nivel freático mínimo y máximo en el modelo (Ver Figura 59b) para el análisis de estabilidad. Por otra parte, para analizar el comportamiento crítico de la ladera, se planteó incrementar la superficie de agua en 10, 20, 30 cm de columna de agua por encima del NF máximo definido y finalmente se analiza la condición extrema cuando el terreno está completamente saturado. Los resultados de análisis de estabilidad de la ladera se presentan en la Tabla 33.

**Tabla 33:** Resumen del Factor de Seguridad mediante cuatro métodos de rebanadas.

Nivel Freático	Factor de seguridad			
	Bishop Simplificado	Janbú Simplificado	Spencer	GLE/Morgenstern-Price
NF_Mínima	1.347	1.351	1.351	1.351
NF_Cond. Actual	1.236	1.247	1.258	1.249
NF_Máxima	1.128	1.140	1.153	1.142
NF_Máxima+10cm	1.033	1.047	1.060	1.049
NF_Máxima+20cm	0.981	0.992	1.007	0.994
NF_Máxima+30cm	0.931	0.940	0.955	0.942
NF_Saturado	0.785	0.785	0.785	0.785

Nota: NF= Nivel freático.

En la Figura 60, se muestra los resultados de análisis de estabilidad del deslizamiento existente en Cercs; donde se obtiene el factor de seguridad variando el nivel freático o superficie de agua. Con los resultados obtenidos se concluye que, cuando se incrementa 20 cm de columna de agua por encima de NF máximo definido; el deslizamiento entra en estado crítico o estrictamente en equilibrio con  $FS \approx 1$ ; Mientras, incrementa 30 cm de columna de agua por encima de NF máximo el  $FS < 1$ ; es decir, al incrementar la presión de poros, la resistencia al corte de argilita alterada disminuye, en consecuencia, posible ocurrencia de un deslizamiento. En cambio, si el terreno se satura por completo la resistencia al corte es superada por el esfuerzo cortante y resulta el  $FS 0.78$ ; por ende, el deslizamiento se activa y entra en movimiento a esta condición extrema.



**Figura 60:** Factor de seguridad respecto a la variación de nivel freático.

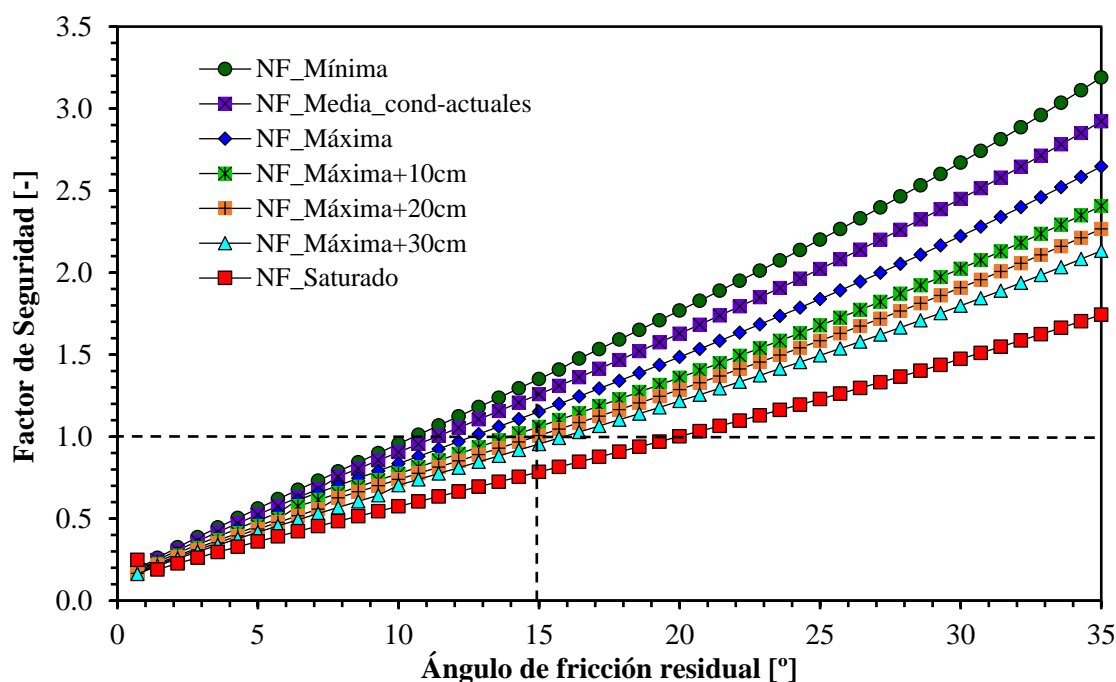
### 5.2.6 Análisis de sensibilidad paramétrica de ángulo de fricción

El análisis de sensibilidad solo se realizó en la capa de argilita alterada, en ella se encuentra la superficie de deslizamiento existente. Para ello, en este material los parámetros resistentes fueron estimados mediante la interpolación de varios ensayos realizados (corte directo y corte anular), en el cual resulta; la cohesión nula y el ángulo de rozamiento interno  $15^\circ$  para condición residual.

La superficie de deslizamiento fue definida mediante tres sondeos manuales. También, se conoce el inicio de la masa deslizada (escarpe, 0.35 m) en la cabecera del deslizamiento y el final del deslizamiento (pie del deslizamiento). Esta superficie en todos los análisis se mantiene constante. Sin embargo, el nivel freático varía de acuerdo a los registros de los piezómetros, ver Figura 59(a).

El análisis de sensibilidad evalúa el comportamiento de factor de seguridad respecto a la variación del ángulo de rozamiento interno residual, para distintos niveles freáticos ya descritos en el ítem 5.2.5. Y los resultados se presentan en la Figura 61.





**Figura 61:** FS obtenido a partir de la variación del NF y el ángulo de fricción residual.

### 5.2.7 Análisis retrospectivo

El análisis retrospectivo también conocido como Back Analysis sirve para representar el comportamiento de la resistencia del terreno in-situ. Este análisis retrospectivo se realizó solamente en la capa de argilita alterada, donde se encuentra la superficie de rotura. De la Figura 61, podemos deducir lo siguiente:

- El NF mínimo definido mediante registros de piezometría se sitúa en promedio a 1.2m de profundidad respecto a la superficie del terreno; para ello, el ángulo de fricción residual representativo resulta 10. 7°, para FS=1.
- Para el NF máximo definido de registros de piezometría, se sitúa a 0.60m de profundidad respecto a la superficie; esta superficie en su mayoría se encuentra por encima de la superficie de rotura. El ángulo de fricción residual representativo resultó 12. 8°, para FS =1 (estrictamente en equilibrio).
- Por otra parte, cuando se supone que el NF incrementa 20cm de columna de agua por encima del NF máximo definido. El ángulo de fricción residual resulta 15° para FS=1. Y cuando el NF incrementa 30cm de columna de agua por encima de NF máximo definido, el ángulo de fricción residual aumenta a 15.8 para FS=1.
- Sin embargo, cuando se supone que todo el terreno está saturado, la estabilidad es más desfavorable, para que cumpla FS=1, se requiere un ángulo de fricción residual de 20°.

Finalmente, se postula que el deslizamiento existente ocurrió cuando el NF incrementó por encima del NF máximo (Figura 59b) hasta la superficie del terreno (saturado). Para conocer exactamente el momento en que ocurrió el deslizamiento es un poco difícil, ya que el NF no es constante; por ello, el ángulo de fricción residual para la argilita alterada se encuentra en el rango de 12.8-20°.

Sin embargo, en el laboratorio resultó el ángulo de fricción residual 15°. Este valor se encuentra en el rango estimado mediante análisis retrospectivo; si se postula que la falla ocurrió cuando el NF incrementó a 30 cm encima del NF máximo, el FS es de 0.95. Y para que llegue a la estabilidad estricta FS=1 el ángulo de fricción residual es de 15.8°.

## 6 MODELACIÓN TERMO-HIDRÁULICO EN CODE\_BRIGHT

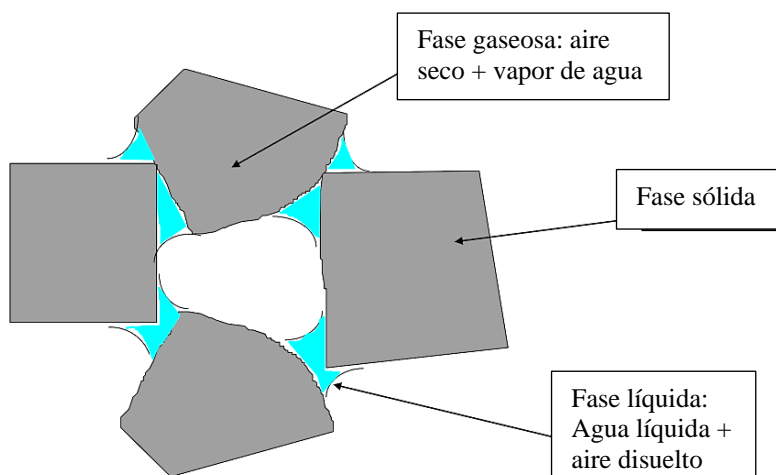
### 6.1 Introducción

El código Code\_Bright (COupled DEformation of BRine Gas and Heat Transport) desarrollado por el Departamento de Ingeniería del Terreno, de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), diseñado para el análisis acoplado en problemas de termo-hidro-mecánico (THM) en medios geológicos. La formulación matemática se basa en un conjunto de ecuaciones que gobiernan y leyes constitutivas.

El código Code\_Bright utiliza el interfaz del Software GiD para el pre-procesamiento y post-procesamiento. A través del entorno de GiD se define la geometría, el mallado, materiales, condiciones de contorno y otros parámetros. El Software GiD fue desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería (CIMNE).

### 6.2 Formulación básica

El suelo se considera un medio poroso compuesto por granos sólidos, agua y gas. Por ello, se toma en cuenta los aspectos: térmicos, hidráulicos y mecánicos, incluido el acoplamiento entre ellos en todas las direcciones posibles. Como se ilustra en la Figura 62, formulación del problema en enfoque multifase y multi especies. Mayores detalles en el Manual de Code\_Bright (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2019).



**Figura 62:** Representación esquemática de material poroso no saturado en manual de Code\_Bright.

La nomenclatura que se utilizará para expresar las fases y especies se detalla de la siguiente manera:

#### Las tres fases son:

- Fase sólida (s) : mineral
- Fase líquida (l) : agua + aire disuelto
- Fase gaseosa (g) : mezcla de aire seco y vapor de agua

#### Las tres especies son:

- Sólido (-) : el mineral y la fase sólida coinciden
- Agua (w) : como líquido o evaporado en la fase gaseosa
- Aire (a) : aire seco, como gas o disuelto en la fase líquida.

Para la formulación del problema se asume las siguientes hipótesis:

- El aire seco se considera una especie única y es el componente principal de la fase gaseosa. La ley de Henry es usada para expresar el equilibrio del aire disuelto, en función de su temperatura.
- Se asume equilibrio térmico de forma que las tres fases están a la misma temperatura.
- La concentración de vapor está en equilibrio con la fase líquida, esta concentración es expresada en la ley psicrométrica.
- Las variables de estado son: los desplazamientos del sólido ( $u$ -en las tres direcciones), la presión de agua ( $P_l$ ), la presión de gas ( $P_g$ ) y la temperatura ( $T$ ).
- Se consideran pequeñas deformaciones para el esqueleto sólido. Los términos advectivos debido a los desplazamientos del suelo se desprecian.
- El balance de momento para especies disueltas y para la fase líquida se reduce a las ecuaciones constitutivas (Ley de Fick's y ley de Darcy).
- Los parámetros físicos en las ecuaciones constitutivas son función de la presión y la temperatura. Es decir; concentración de vapor bajo superficie plana (ley psicrométrica); tensión superficial (curva de retención); viscosidad dinámica (Ley de Darcy).

### 6.2.1 Ecuaciones que gobiernan

Las ecuaciones que gobiernan el flujo no isotermodinámico multifásico de agua y gas a través de un medio poroso deformable han sido presentadas por Olivella et al., (1994). La derivación detallada se encuentra en esta referencia; en los apartados siguientes solo se describirá de forma general.

Las ecuaciones que gobiernan se agrupan en cuatro grupos principales, éstas son: 1) ecuaciones de balance; 2) ecuaciones constitutivas; 3) condiciones de equilibrio; 4) condiciones de contorno de flujo y condiciones atmosféricas.

#### 6.2.1.1 Ecuaciones de balance

El balance de masa consiste en equilibrar las especies en lugar de las fases. La masa volumétrica de una especie en una fase; por ejemplo, el agua en fase gaseosa  $\rho_g^w$  es el producto de la fracción másica de esa especie ( $\omega_g^w$ ); y la densidad aparente de la fase ( $\rho_g$ ); es decir,  $\rho_g^w = \omega_g^w \rho_g$ .

El flujo de masa total de una especie en una fase; es decir, el flujo de aire presente en la fase gaseosa  $\mathbf{j}_g^w$  es, en general la suma de tres términos:

1. El flujo no advectivo:  $\mathbf{i}_g^w$ ; por ejemplo, difusivo/dispersivo.
2. El flujo advectivo causado por el movimiento de sólido:  $\omega_g^w \rho_g \mathbf{q}_g$ , donde  $\mathbf{q}_g$  es el flujo de Darcy.
3. El flujo advectivo causado por el movimiento de sólido:  $\omega_g^w \rho_g S_g \Phi \frac{du}{dt}$ , donde  $\frac{du}{dt}$  es el vector de velocidades sólidas,  $S_g$  es la fracción volumétrica de los poros por la fase gaseosa y  $\Phi$  es la porosidad.

La suma de flujos advectivo y no advectivo se separa del flujo total para simplificar las ecuaciones algebraicas. Este flujo es relativo a la fase sólida y se denomina  $\mathbf{j}'^w$ . Esta corresponde al flujo total menos la parte advectiva causada por el movimiento sólido. Cuando la deformación sólida es despreciable, entonces  $\mathbf{j}' = \mathbf{j}$ .

Para expresar las ecuaciones de balance, se ha usado la notación establecida en el manual de Code\_Bright y se detalla en la Tabla 34.

**Tabla 34:** Notación establecida para Code\_Bright.

$\Phi$ : Porosidad	$\mathbf{b}$ : Fuerzas másicas.
$\rho$ : Densidad	$\omega$ : Fracción másica
$\mathbf{j}$ : Flujo másico	$\rho$ : Contenido másico por unidad de volumen de fase,
$\dot{\mathbf{i}}$ : Flujo no advectivo	$e$ : Energía interna específica
$\mathbf{q}$ : Flujo no advectivo	$\mathbf{i}_c$ : Conducción de calor
$\mathbf{u}$ : Desplazamiento del sólido	$\mathbf{i}_e$ : Flujo de energía debido al movimiento de másico.
$\boldsymbol{\sigma}$ : Tensor de tensiones	
$S_l, S_g$ : Grado de saturación de la fase líquida y gaseosa (Fracción del volumen de poro ocupado por cada fase).	
<b>Superíndice</b> $w$ y $a$ se refieren a agua y aire,	
<b>Subíndice</b> $s, l$ y $g$ se refieren a fase sólido, líquido y gas.	

Fuente: Manual de Code\_Bright User's Guide (2019).

### **Balance de masa del sólido**

El balance de masa del sólido presente en el medio se describe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho_s(1-\phi))}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s) = 0 \quad (45)$$

Donde,  $\rho_s$  es la masa de sólidos por unidad de volumen de sólido y  $\mathbf{j}_s$  es el flujo de sólido. A partir de esta ecuación, se obtiene la expresión para variación de porosidad y se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{D_s \phi}{Dt} = \frac{(1-\phi)}{\rho_s} \frac{D_s \rho_s}{Dt} + (1-\phi) \nabla \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} \quad (46)$$

Donde, se ha utilizado la derivada material con respecto al sólido y se define de la siguiente manera:

$$\frac{D_s(\blacksquare)}{Dt} = \frac{\partial(\blacksquare)}{\partial t} + \frac{d\mathbf{u}}{dt} \cdot \nabla(\blacksquare) \quad (47)$$

### **Balance de masa del agua**

El agua se encuentra en la fase líquida y gaseosa. El balance de masa total de agua se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \left( (\omega_g^w \rho_g S_g + \omega_l^w \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^w + \mathbf{j}_l^w) = f^w \quad (48)$$

Donde:  $f^w$  es el suministro externo de agua. No incluye el término interno de producción, porque se realiza el balance de masa total dentro del medio. El uso de la derivada material conduce:

$$\phi \frac{D_s(\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g)}{Dt} + (\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g) \frac{D_s \phi}{Dt} + (\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g) \phi \nabla \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (49)$$

El objetivo es encontrar las incógnitas de las ecuaciones gobernantes. Es decir, las variables dependientes están relacionadas con las incógnitas. Por ejemplo, el grado de saturación se

obtendrá utilizando la curva de retención, el cual debería expresarse en términos de temperatura, presión de líquido y presión de gas.

#### **Balance de masa del aire**

Para obtener la ecuación de balance de masa del aire se toma en cuenta, que el aire es el componente principal de la fase gaseosa y que también puede estar presente como aire disuelto en la fase líquida. Y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \left( (\omega_g^a \rho_g S_g + \omega_l^a \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^a + \mathbf{j}_l^a) = f^a \quad (50)$$

Donde:  $f^a$  suministro externo de aire. Mediante el uso de la derivada material se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \phi \frac{D_s (\omega_l^a \rho_l S_l + \omega_g^a \rho_g S_g)}{Dt} + (\omega_l^a \rho_l S_l + \omega_g^a \rho_g S_g) \frac{D_s \phi}{Dt} \\ + (\omega_l^a \rho_l S_l + \omega_g^a \rho_g S_g) \phi \nabla \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a \end{aligned} \quad (51)$$

#### **Balance de momento del medio**

La ecuación de equilibrio de momentos se reduce al equilibrio de tensiones si se ignoran los términos inerciales y se expresa de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (52)$$

Donde:  $\boldsymbol{\sigma}$  tensor de tensiones y  $\mathbf{b}$  es el vector del campo de fuerza.

#### **Balance de energía interna del medio**

La ecuación para el balance de energía interna del medio poroso se establece teniendo en cuenta la energía interna de cada fase ( $e_s, e_l, e_g$ ) y se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (e_g \rho_s (1 - \phi) + e_g \rho_g S_g \phi + e_l \rho_l S_l \phi)}{\partial t} - \frac{\phi S_g p_g}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \\ + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{es} + \mathbf{j}_{eg} + \mathbf{j}_{el}) = f^Q \end{aligned} \quad (53)$$

Donde,  $\mathbf{i}_c$  es el flujo de energía debido a la conducción a través del medio poroso.  $\mathbf{j}_{es}, \mathbf{j}_{eg}, \mathbf{j}_{el}$  Son otros flujos advectivos de energía causado por movimiento de masa. Y  $f^Q$  es un suministro de energía interna/externa.

#### **6.2.1.2 Ecuaciones constitutivas**

##### **Ley de Darcy**

Los flujos (líquido y gas) advectivos de las fases fluidas se rigen a la ley generalizada de Darcy, y se expresa de la siguiente manera:

$$q_\alpha = -K_\alpha (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha g) \quad ; \quad \alpha = l, g \text{ (líquido y gas)} \quad (54)$$

Donde:  $P$  es la presión;  $\rho$  es la densidad;  $g$  es la gravedad;  $K_\alpha = \mathbf{k}(k_{ra}/\mu_\alpha)$  es el tensor de permeabilidad.  $\mathbf{k}$ , tensor de la permeabilidad intrínseca, que depende de la estructura porosa del

medio poroso.  $k_{ra}$ , permeabilidad relativa.  $\mu_\alpha$ , viscosidad dinámica. La variación de la permeabilidad intrínseca con la porosidad se expresa con la formulación de Kozeny, esta ecuación fue descrita en el ítem (3.2.4) con detalle.

### **Curva de retención del material**

La curva de retención o curva característica representa cuánta agua puede retenerse un medio poroso, y el ajuste se representa mediante el modelo de Van Genuchten (1980).

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left( 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} ; \quad P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (55)$$

### **Ley de Fick**

El flujo no advectivo de especies dentro de la fase líquida es calculada mediante la ley de Fick.

$$\mathbf{i}_\alpha^i = -(\tau \phi \rho_\alpha S_\alpha D_m^i \mathbf{I}) \nabla \omega_\alpha^i \quad (56)$$

Donde:  $\tau$  es la tortuosidad del medio;  $\phi$  es la porosidad;  $\rho_\alpha$ , densidad;  $S_\alpha$ , grado de saturación;  $\omega_\alpha^i$  es la fracción másica de la fase  $\alpha$ ; y  $D_m^i$  es el coeficiente de difusión molecular del componente  $i$  en la fase  $\alpha$ . Luego, la difusión molecular de vapor de agua y la difusión molecular de sales se determinan con la ecuación (56).

$$D_m^{vapor} = D \left( \frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right) ; \quad D_m^{aire-soluto} = D \exp \left( \frac{-Q}{R(273.15 + T)} \right) \quad (57)$$

Donde:  $D$ ,  $Q$  y  $n$  son parámetros;  $R$  es la constante de gas ideal y  $P_g$  es la presión del gas.

### **Ley de Fourier**

Esta ley constitutiva describe la parte térmica; es decir, la conducción de calor y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$i_c = -\lambda \nabla T \quad (58)$$

Donde:  $\lambda$  es la conductividad térmica del medio poroso. Para estimar la conductividad térmica seca, saturada y para el sólido se determina con las siguientes ecuaciones 59 y 60.

$$\lambda_{dry} = \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{gas}^\phi ; \quad \lambda_{sat} = \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{liq}^\phi \quad (59)$$

$$\lambda_{solid} = (\lambda_{solid})_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad (60)$$

## **6.2.2 Restricciones de equilibrio**

Las restricciones de equilibrio se dan para la concentración de vapor de agua en gas y la concentración de aire disuelto en el agua.

### **Ley de Henry**

Mediante esta ley se determina la solubilidad del aire en el agua.

$$\omega_t^a = \frac{P_a M_a}{H M_w} \quad (61)$$



Donde:  $\omega_l^a$  es la fracción de masa de aire en el líquido;  $P_a$ , presión parcial del aire;  $M_a$ , masa molar del aire (0.02895 Kg/mol);  $M_w$ , masa molar de agua (0.018 kg/mol) y H es un parámetro constante (10000 MPa).

### **Ley de Psicometría**

Con esta ley se obtiene la masa de vapor de agua por unidad de volumen de gas ( $\theta_g^w$ ).

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)^0 \exp\left(\frac{-(P_g - P_l)M_w}{R(273.15 + T)\rho_l}\right) \quad (62)$$

Donde:  $(\theta_g^w)^0$  es la densidad de vapor en la fase gaseosa en contacto con una superficie plana y depende de la temperatura; R, constante de gas (8.314 J/mol K); T, temperatura (°C).

### **6.2.3 Condición de contorno del flujo**

La condición de contorno solo aplica cuando se tiene alguna ecuación de balance (agua, aire, energía) para solucionar el problema de flujo. En Code\_Bright se expresa para los flujos nodales para cada componente (agua, aire y calor) y cada fase (líquido, gas) en función de las variables de estado ( $P_l$ ,  $P_g$  y T) y algunos valores prescritos, especificados por el usuario.

$$j_g^w = (\omega_g^w)^0 j_g^0 + (\omega_g^w)^0 \gamma_g (P_g^0 - P_g) + \beta_g \left( (\rho_g \omega_g^w)^0 - (\rho_g \omega_g^w) \right) \quad (63)$$

Donde: El superíndice “0” representa los valores prescritos,  $\omega$  es la fracción másica,  $\rho$  es la densidad,  $P_g$  es la presión del gas,  $j_g^0$  es un flujo de gas prescrito,  $\gamma_g$  y  $\beta_g$  son dos parámetros de condición de contorno.

Por otro lado, para la fase líquida.

$$j_l^w = (\omega_l^w)^0 j_l^0 + (\omega_l^w)^0 \gamma_l (P_l^0 - P_l) + \beta_l \left( (\rho_l \omega_l^w)^0 - (\rho_l \omega_l^w) \right) \quad (64)$$

## **6.3 Condiciones atmosféricas**

La interacción de suelo-atmósfera requiere un análisis acoplado de flujo de masa y transferencia de calor; para ello, Code\_Bright facilita este acoplamiento de Termo-Hidráulico (TH), bajo condiciones atmosféricas como: evaporación, precipitación, radiación, flujos de energía advectiva y convectiva. Los cuales se expresan en términos de flujos de agua, aire y energía en función de las variables del estado ( $P_l$ ,  $P_g$ , T) y datos meteorológicos (temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, nubosidad, precipitación, velocidad del viento, radiación) que varían en el tiempo. A continuación, se describe el flujo de masa y flujo de energía de acuerdo al manual de Code\_Bright.

### **6.3.1 Flujo de masa**

#### **Flujo de gas**

El flujo de la fase gaseosa ( $q_g$ ) viene dada por la siguiente ecuación:

$$q_g = \gamma_g (P_g - P_{ga}) \quad (65)$$

Donde:  $\gamma_g$  es un coeficiente de almacenamiento,  $P_g$  es la presión de gas y  $P_{ga}$  es la presión atmosférica.

### Flujo de aire

Para el flujo de aire ( $j_a$ ) solo se considera la parte advectiva, y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$j_a = \omega_g^a q_g = (1 - \omega_g^w) q_g \quad (66)$$

### Flujo de agua

El flujo de agua ( $j_w$ ) que se infiltra en el terreno es la suma de: precipitación pluvial  $P$ , evaporación  $E$ , flujo advectivo de vapor de la fase gaseosa ( $j_g^w$ ) y de la escorrentía superficial ( $j_{sr}$ ) y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$j_w = k_{rain}P + k_{evap}E + j_g^w + j_{sr} \quad (67)$$

Donde:  $k_{rain}$  y  $k_{evap}$  son coeficientes de datos de entrada y se pueden usar para desactivar su flujo respectivo. El valor positivo [+] se considera para flujos de entrada y negativos [-] para flujos de salida para la simulación.

- La evaporación ( $E$ ) está expresada por una relación de difusión aerodinámica:

$$E = \frac{k^2 v_a \phi}{\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right)^2} (\rho_{va} - \rho_v) \quad (68)$$

Donde:  $\rho_{va}$  y  $\rho_v$  son la humedad absoluta (masa de vapor por volumen de gas, que se puede calcular a partir de la humedad relativa y la temperatura) de la atmósfera y el nodo de la condición de contorno;  $k$  es la constante de von Karman's (usualmente se considera 0.4);  $\phi$  factor estabilizador;  $z_0$  altura de la rugosidad;  $v_a$  es la velocidad del viento y la altura de medida  $z_a$ .

- El flujo advectivo de vapor de la fase gaseosa ( $j_g^w$ ), es obtenido mediante dos condiciones de presión de gas respecto a la presión atmosférica.

$$\begin{aligned} j_g^w &= \omega_g^w q_g \quad ; \quad P_g > P_{ga} \\ j_g^w &= \frac{\rho_{va}}{\rho_{ga}} q_g \quad ; \quad P_g \leq P_{ga} \end{aligned} \quad (69)$$

Donde:  $\omega_g^w$  es la fracción de masa de vapor,  $\rho_{ga}$  es la densidad atmosférica del gas y  $q_g$  es el flujo de la fase gaseosa. Obtenida en la ecuación (Flujo de gas).

- La escorrentía superficial ( $j_{sr}$ ) es el agua que no se infiltra en el terreno y que discurre por la superficie. Esto ocurre cuando el suelo se encuentra saturado ( $P_l > P_{ga}$ ).

$$\begin{aligned} j_{sr} &= \gamma_w (P_l - P_{ga}) \quad si \quad P_l > P_{ga} \\ j_{sr} &= 0 \quad si \quad P_l \leq P_{ga} \end{aligned} \quad (70)$$

Donde:  $\gamma_w$  es coeficiente de almacenamiento. La estanqueidad no se simula explícitamente, Code\_Bright no tiene un elemento especial que represente el almacenamiento de agua en un estanque. Cuando se asume que no hay almacenamiento, se puede usar un valor alto de  $\gamma_w$  (pero no muy alto para evitar inestabilidad numérica).

### 6.3.2 Flujo de energía

#### Radiación

Hay varias maneras para evaluar la radiación (usando ISUN): 0 para el plano horizontal; 1 para el cilindro vertical y 2 para la medición de radiación atmosférica (radiaciones de longitud de onda corta - larga).

La radiación  $R_n$  puede conseguirse como un dato medido o puede calcularse, dependiendo del valor de ISUN:

$$\begin{aligned} R_n &= (1 - A_l)R_g + \varepsilon R_a - \varepsilon \sigma T^4 & \text{si } ISUN \leq 1 \\ R_n &= (1 - A_l)R_m - \varepsilon \sigma T^4 & \text{si } ISUN = 2 \\ R_n &= R_m & \text{más} \end{aligned} \quad (71)$$

Donde:  $R_g$  es la radiación solar directa de onda corta;  $R_a$  es la radiación atmosférica de onda larga;  $A_l$  es el albedo;  $\varepsilon$  es la emisividad,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) y  $R_m$  representa los valores de radiación medido.

Tanto el albedo ( $A_l$ ) y la emisividad ( $\varepsilon$ ) se consideran en función de saturación líquida ( $S_l$ ):

$$A_l = A_d + (A_w - A_d)(S_l^2 - 2S_l) \quad (72)$$

$$\varepsilon = 0.9 + 0.05S_l \quad (73)$$

Donde:  $A_d$  y  $A_w$  son albedo seco y húmedo.

La radiación atmosférica de onda larga ( $R_a$ ) depende de la temperatura atmosférica y la humedad absoluta de acuerdo con la relación empírica:

$$R_a = \varepsilon \sigma T^4 (0.605 + 0.048 \sqrt{1370 \rho_{va}}) \quad (74)$$

Para el cálculo de la radiación solar ( $R_g$ ) se tiene en cuenta la hora del día y el año según la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} R_g &= \frac{\pi R_G}{2d_s} \sin\left(\frac{(t - t_m + 0.5d_s)\pi}{d_s}\right) & t_m - 0.5d_s \leq t \leq t_m + 0.5d_s \\ R_g &= 0 & \text{si de otra manera.} \end{aligned} \quad (75)$$

Donde:  $d_s$  es el intervalo de tiempo entre el amanecer y el atardecer;  $t_m$  es la hora del mediodía y  $R_g$  es la radiación solar diaria calculada por una relación empírica:

$$R_G = \int_{t_m - 0.5d_s}^{t_m + 0.5d_s} R_g dt = R_A (0.29 \cos \lambda + 0.521 I_n) \quad (76)$$

Donde:  $\lambda$  es la latitud;  $I_n$  es el índice de nubes (para un cielo despejado = 1, mientras para un cielo completamente nublado = 0) y  $R_A$  es la radiación solar diaria en ausencia de la atmósfera:

$$R_A = S_0 r_s \left[ \frac{d_d}{\pi} \cos \lambda \cos \delta \sin\left(\frac{\pi d_s}{d_d}\right) + d_s \sin \lambda \sin \delta \right] \quad (77)$$

Donde:  $S_0$  es una constante solar (considerado  $1367 \text{ J.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $r_s$  es la relación entre la distancia promedio entre la tierra y el sol, esto en un momento dado;  $d_a$  es la duración del día en segundos (86400 s) y  $\delta$  es la inclinación del sol. Los valores de  $d_s$ ,  $r_s$  y  $\delta$  se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$d_s = \frac{d_a}{\pi} \text{acos}(-\tan\lambda \tan\delta) \quad (78)$$

$$r_s = 1.00011 + 0.03422 \cos\left(2\pi \frac{t-t_0}{d_a}\right) + 0.00128 \sin\left(2\pi \frac{t-t_0}{d_a}\right) \\ + 0.000179 \cos\left(4\pi \frac{t-t_0}{d_a}\right) + 0.000077 \sin\left(2\pi \frac{t-t_0}{d_a}\right) \quad (79)$$

$$\delta = -\delta_{\max} \sin\left(2\pi \frac{t-t_s}{d_a}\right) \quad (80)$$

Donde:  $d_a$  es la duración de un año (365.241 días este equivale a  $3.15568 \times 10^7$  s);  $t_0$  es la fecha de 1 de enero;  $t_s$  es el tiempo cuando comienza el otoño (21 de septiembre, para hemisferio norte) y  $\delta_{\max}$  es la declinación máxima del sol ( $0.4119 \text{ rad} = 23.26^\circ$ ).

### ***Efectos de la atmósfera en la radiación solar***

Una parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera que se expresa como la transmisividad atmosférica ( $\tau_a$ ), para calcular existen varias opciones, para el presente trabajo solo se dispone de datos medidos de temperatura atmosférica; por ello, se ha utilizado el método de Hargreaves (Hargreaves y Allen, 2003). Y se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_a = K_H \sqrt{T_a^{\max} - T_a^{\min}} \quad (81)$$

Donde:  $T_a^{\max}$  y  $T_a^{\min}$  son la temperatura atmosférica máxima y mínima diaria y  $K_H$  es una constante empírica. Allen et al. (1998) recomienda  $K_H=0.16$  para interior; mientras para regiones costeras  $K_H=0.19$ .

Existe otro factor como la dispersión de la luz solar en la atmósfera; es decir, la superficie terrestre recibe parte de la radiación solar directamente del sol y la otra recibe en forma dispersa o difusa. Una superficie inclinada a la sombra no recibe la radiación solar directa solo recibe la difusa. La fracción de radiación solar difusa se calcula a partir de  $\tau_a$ , formulación empírica (Boland y Ridley, 2008).

$$f_{dif} = \frac{1}{1 + \exp(8.6\tau_a - 5)} \quad (82)$$

Para calcular la radiación solar en una superficie inclinada se utiliza la siguiente expresión:

$$R_s = S_0 f_c \tau_a [(1 - f_{dif}) \max(p^T s, 0) + f_{dif} f_{sv} s_{up} + A_l (1 - f_{sv}) s_{up}] \\ = R_{s,hor} \left[ (1 - f_{dif}) \frac{\max(p^T s, 0)}{s_{up}} + f_{dif} f_{sv} + A_l (1 - f_{sv}) \right] \quad (83)$$

Donde: El primer término es la radiación solar directa, el segundo la radiación solar difusa y el tercero es la cantidad de radiación reflejada del entorno.  $f_{sv}=(\cos(2\beta)+3)/4$ . Mayores detalles se puede encontrar en (Badescu, 2002).

#### ***Flujo de energía advectiva***

El flujo de calor sensible ( $H_s$ ), como la evaporación, se calcula a través de una relación de difusión aerodinámica.

$$H_s = \frac{k^2 v_a \phi}{\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right)^2} \rho_{ga} C_a (T_a - T) \quad (84)$$

Donde:  $C_a$  es calor específico del gas,  $T$  es la temperatura de la atmósfera.

#### ***Flujo de energía convectiva***

El flujo de calor por convección ( $H_c$ ) se calcula teniendo en cuenta la energía interna del agua líquida, vapor y aire.

$$H_c = h_v(E + j_w^g) + h_{la}(P + j_w^l) + h_{a0}j_a \quad (85)$$

Donde:  $h_v$ ,  $h_{la}$  y  $h_{a0}$ , la energía libre de vapor, agua líquida y aire. Estas propiedades dependen de la temperatura. Las temperaturas usadas son la temperatura en el nodo del contorno para  $h_v$  y  $h_{a0}$  y temperatura del punto de rocío, que depende de la presión atmosférica de vapor, para  $h_{la}$ .

#### ***Flujo de energía total***

El flujo total de energía ( $j_e$ ) llega a la superficie del terreno, se calcula mediante la suma de radiación solar ( $R_n$ ), el flujo de calor sensible ( $H_s$ ) y el flujo de calor por convección ( $H_c$ ) se expresa de la siguiente manera:

$$j_e = k_{rad}R_n + H_s + H_c \quad (86)$$

Donde:  $k_{rad}$  es un parámetro de entrada y se puede usar para deshabilitar el flujo de radiación.

## **6.4 Implementación del modelo Termo-Hidráulico en la ladera natural en Cercs**

En este ítem se presenta la modelización numérica bajo condiciones de termo-hidráulico (TH) y factores atmosféricos que influyen en la ladera natural en Cercs. Para ello, se ha utilizado el código de Code\_Bright en el interfaz de GiD. El objetivo del modelo es simular la evolución del comportamiento de los flujos (agua, aire y energía); como funciones variables de estado: presión de líquido, presión de gas y temperatura del suelo.

La simulación numérica en Code\_Bright se ha realizado para cuatro años, la cual comprende desde enero del 2015 a diciembre del 2018. Estos datos simulados serán comparados con los datos medidos con sensores geotécnicos auscultados en la zona de estudio. Para ello, se ha realizado dos modelos: El primero se trata de un modelo sencillo de representación unidimensional 1D; mientras el segundo modelo es bidimensional 2D representando la configuración geométrica real de la ladera en Cercs.

Para desarrollar los modelos 1D y 2D en Code\_Bright comprenden ocho pasos básicos: 1) Definición de la geometría del modelo mediante puntos, líneas y superficie (NURBS). 2) Definir los datos del problema. 3) Definición de los materiales en el modelo. 4) Definición de condiciones de contorno (flujo y atmosférico). 5) Definición del intervalo de datos. 6) Generación de la malla con refinamiento en la zona de interés. 7) Etapa de cálculo en Code\_Bright y 8) Post procesamiento y visualización de los resultados del modelo.

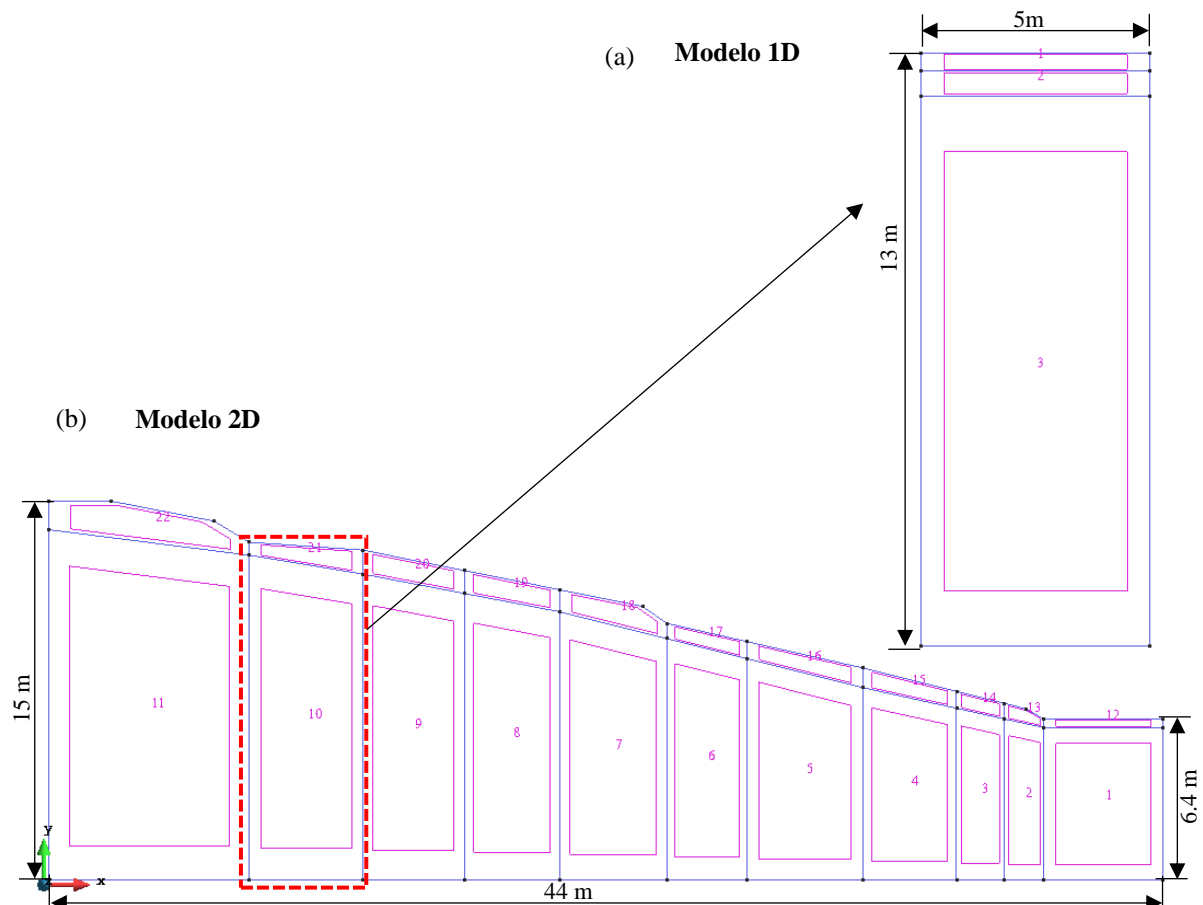
### **6.4.1 Definición de la geometría del modelo**

El Software GiD dispone de herramientas para dibujar los puntos, líneas, superficies y volúmenes, para definir la configuración geométrica de los modelos. También, dispone de barra comandos, ingresando la geometría mediante las coordenadas relativas.

La geometría para el modelo unidimensional 1D, comprende de un rectángulo 5m de ancho y 13m de longitud representando la profundidad en dirección “Y”. Este rectángulo se ha partido en tres superficies y cada uno presenta un material; tales como: coluvial en la parte superior con espesor de 0.40 m; seguido por la capa intermedia representando a argilita alterada con espesor de 0.55 m, y finalmente conformado por argilita inalterada con espesor de 12.05 m.

En cambio, para el modelo bidimensional 2D, la geometría fue creada a través de AutoCad, partiendo del modelo geológico definido en el ítem 3.2.2. (Figura 8). La simplificación de la geometría fue mínima en la superficie del terreno natural para facilitar los cálculos y para el proceso de mallado. Mientras el límite entre capa es exactamente el mismo contacto definido en el modelo geológico.

Por otra parte, en este modelo 2D por tratarse de dimensiones reales de la ladera en Cercs, las dos primeras capas son delgadas de espesor 0.40 y 0.55 m. Por ende, se ha simplificado a una sola capa para evitar problemas de mallado y convergencia. Finalmente, el modelo queda representado por dos capas coluvial y argilita inalterada. La capa coluvial fue definida por 11 superficies de NURBS y la capa argilita inalterada definida por 11 superficies NURBS (Ver Figura 63b). Geométricamente, el perfil longitudinal del modelo comprende de 44 m, con inclinación de 10-15°, la altura máxima de 15 m y altura mínima de 6.4 m.

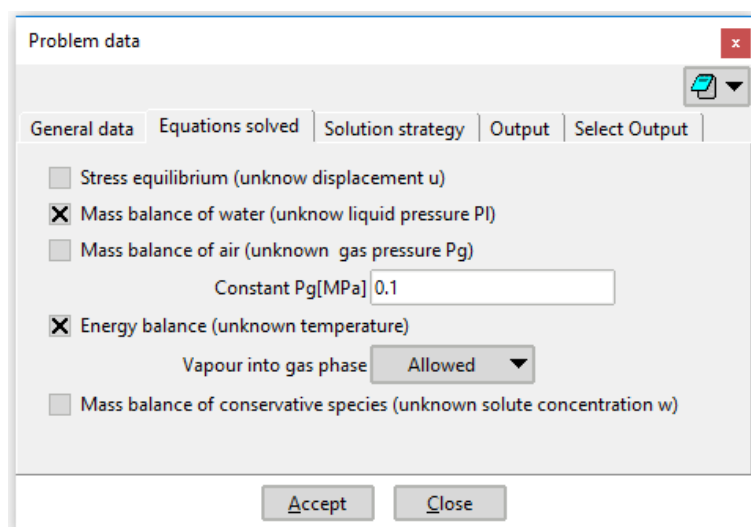


**Figura 63:** Definición del modelo en Code\_Bright. (a) Unidimensional 1D y (b) bidimensional 2D.

#### 6.4.2 Definición de datos del problema

Code\_Bright dispone para definir los datos del problema de forma general, tales como: el título del modelo, ecuaciones a resolver, estrategias de solución y selección de salida de datos. Mayores detalles se encuentran en el manual de Code\_Bright.

En ambos modelos 1D y 2D se seleccionó la ecuación de balance de masa de agua y la ecuación de balance de energía. Sin embargo, en este modelo no se realiza el balance de masa de aire, en tal sentido, se define la presión del gas constante de 0.1 MPa (Figura 64).



**Figura 64:** Definición de datos del problema para el modelo 1D y 2D.



### 6.4.3 Parámetros del material

La ladera que se estudia comprende de tres capas: coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. Para el modelo unidimensional 1D se ha trabajado con las tres capas. Sin embargo, en el modelo bidimensional 2D se ha simplificado a dos capas coluvial y argilita inalterada. Cabe precisar, la capa coluvial y argilita alterada se asumió como una sola capa con características de coluvial.

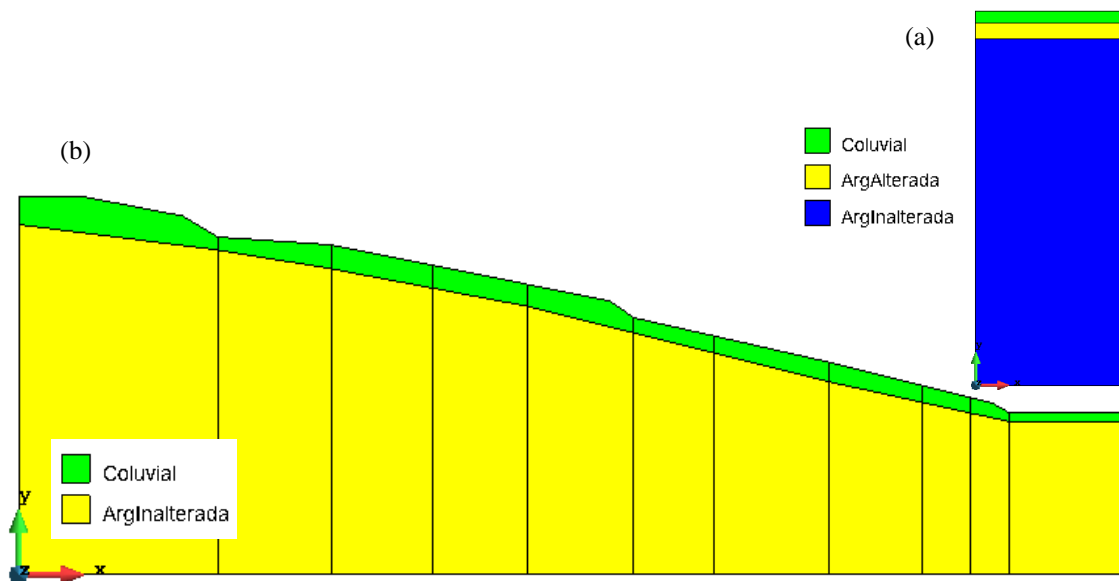
La permeabilidad intrínseca fue estimada a partir de ensayos de campo y laboratorio las cuales se encuentran detalladas en el ítem 3.2.4. También, la porosidad de cada material fue deducida a partir del índice de poros en laboratorio.

La curva de retención para coluvial es estimada a partir de datos de campo (succión vs contenido volumétrico de agua), mientras para la argilita inalterada fue tomada de un artículo “Evaporación, contracción y permeabilidad intrínseca de arcilla no saturada” realizado por Trabelsi, Hadrich y Gruiras (2018).

En la Tabla 35 se resumen los parámetros de las tres capas (coluvial, argilita alterada y argilita inalterada). Estos parámetros han sido ingresados al modelo 1D y 2D en Code\_Bright (Figura 65)

**Tabla 35:** Parámetros de los materiales para la modelación Termo-Hidráulico (TH)

Descripción-Parámetros	Variable	Unidad	Coluvial	Argilita Alterada	Argilita Inalterada
<b>Curva de retención (modelo Van Genuchten), ITYCL 1.</b>					
Valor de entrada de aire.	$P_0$	[MPa]	0.159	0.380	1.030
Tensión superficial del agua.	$\sigma_0$	[N/m]	0.072	0.072	0.072
Factor de forma del modelo Van Genuchten.	$\lambda$	[-]	0.31	0.36	0.30
Valor de saturación residual.	$S_{rl}$	[-]	0.55	0.55	0.05
Valor de saturación máxima.	$S_{ls}$	[-]	1.00	0.95	1.00
<b>Permeabilidad intrínseca (Modelo Kozeny), ITYCL 1.</b>					
Permeabilidad intrínseca (1° dirección principal).	$(k_{11})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Permeabilidad intrínseca (2° dirección principal).	$(k_{22})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Permeabilidad intrínseca (3° dirección principal).	$(k_{33})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Porosidad inicial del material.	$\phi_0$	[-]	0.373	0.356	0.300
Porosidad mínima del material.	$\phi_{min}$	[-]	0.010	0.010	0.010
<b>Permeabilidad relativa en la fase líquida (modelo Van Genuchten), ITYCL 1.</b>					
Factor de forma del modelo Van Genuchten.	$\lambda$	[-]	0.31	0.36	0.30
Valor de saturación residual.	$S_{rl}$	[-]	0.55	0.55	0.05
Valor de saturación máxima.	$S_{ls}$	[-]	1.00	0.95	1.00
<b>Permeabilidad relativa de fase gas (Ley cúbica), ITYCL 6</b>					
	A	[-]	1.00	1.00	1.00
	$\lambda$	[-]	3.00	3.00	3.00
<b>Flujo difusivo de vapor (-), ITYCL 1</b>					
Parámetros para la difusión molecular de vapor o aire.	D	[-]	5.90E-06	5.90E-06	5.90E-06
	n	[-]	2.30	2.30	2.30
Coefficiente de tortuosidad.	$[\tau_0]$	[-]	1.00	1.00	1.00
<b>Flujo conductivo de calor, ITYCL 1</b>					
Conductividad térmica del medio poroso seco.	$\lambda_{dry}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0.22	0.22	0.22
Conductividad térmica del medio poroso saturado.	$\lambda_{sat}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	1.10	1.10	1.10



**Figura 65:** Asignación de material. (a) Modelo 1D y (b) Modelo 2D.

#### 6.4.4 Definición de condiciones de contorno en el modelo

##### *Definición de porosidad inicial en superficies del modelo*

Para definir la condición inicial de porosidad en las superficies del modelo 1D y 2D; se ha utilizado los resultados de porosidad, deducidos a partir de índice de poros obtenido en laboratorio para cada material.

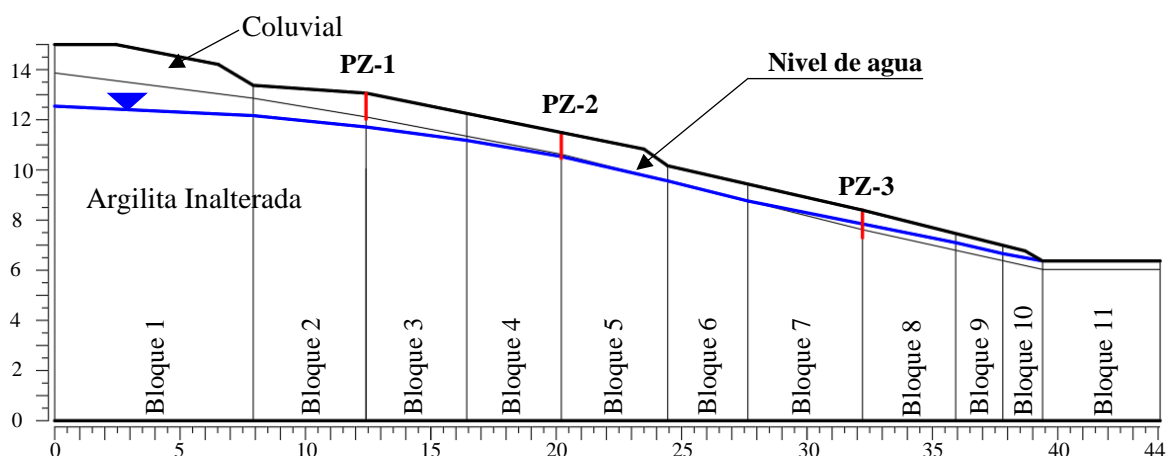
La porosidad inicial definido para coluvial es 0.373, para argilita alterada 0.356 y para argilita inalterada 0.322. Estos valores han sido asignados en el modelo a cada superficie y material que corresponde.

##### *Definición de condición inicial Unknowns*

En el problema planteado es importante definir la presión de líquido a lo largo del perfil longitudinal de la ladera en Cercs (Figura 66). En el modelo 2D la superficie de agua tiene un gradiente y es ligeramente paralela a la superficie del terreno; por ello, se ha dividido en varios bloques para ingresar la presión de líquido a distintas alturas piezométricas como se presenta en la Figura 66.

Por un lado, la presión de gas atmosférica ( $P_{ga}$ ) se ha considerado constante igual a la presión atmosférica de 0.1 MPa. Por lo tanto, no se considera la ecuación de balance de aire en este problema, esto significa que la fase de gas es perfectamente móvil. También, la temperatura se ha considerado constante de 12°C.

La sección estudiada fue dividida en 11 bloques y cada bloque tiene dos superficies, una en la parte superior que representa a coluvial y otra en la parte inferior que representa a argilita inalterada. En cada bloque se ha definido las condiciones iniciales de presión de líquido ( $P_l$ ), presión de gas ( $P_g$ ) y la temperatura ( $T$ ). En la Tabla 36 se detalla la distribución lineal, concentración y la posición final (coordenada relativa en eje Y).



**Figura 66:** El modelo 2D dividido en 11 bloques para definir la presión de líquido en cada bloque.

Para el modelo unidimensional 1D las condiciones iniciales son similares al bloque 2. Sin embargo, para el modelo bidimensional 2D la condición de Unknowns se detalla en la Tabla 36, para cada bloque.

**Tabla 36:** Condiciones iniciales para el modelo 2D.

Bloque o superficie	Material/Capa	Distribución lineal			Concentración [kg/kg]			Concentración [kg/kg]
		Pl [MPa]	Pg [MPa]	T [°C]	Pl [MPa]	Pg [MPa]	T [°C]	Punto final "Y"
1	Coluvial	0.075	0.1	12	0.088	0.1	12	14.71
	Arg_inalterada	0.088	0.1	12	0.222	0.1	12	13.37
2	Coluvial	0.085	0.1	12	0.092	0.1	12	13.22
	Arg_inalterada	0.092	0.1	12	0.217	0.1	12	12.49
3	Coluvial	0.085	0.1	12	0.095	0.1	12	12.66
	Arg_inalterada	0.095	0.1	12	0.212	0.1	12	11.73
4	Coluvial	0.087	0.1	12	0.096	0.1	12	11.87
	Arg_inalterada	0.096	0.1	12	0.205	0.1	12	10.98
5	Coluvial	0.085	0.1	12	0.095	0.1	12	11.07
	Arg_inalterada	0.095	0.1	12	0.196	0.1	12	10.1
6	Coluvial	0.090	0.1	12	0.096	0.1	12	9.8
	Arg_inalterada	0.096	0.1	12	0.188	0.1	12	9.16
7	Coluvial	0.092	0.1	12	0.099	0.1	12	8.92
	Arg_inalterada	0.099	0.1	12	0.181	0.1	12	8.19
8	Coluvial	0.093	0.1	12	0.100	0.1	12	7.93
	Arg_inalterada	0.100	0.1	12	0.172	0.1	12	7.21
9	Coluvial	0.095	0.1	12	0.101	0.1	12	7.23
	Arg_inalterada	0.101	0.1	12	0.167	0.1	12	6.59
10	Coluvial	0.096	0.1	12	0.102	0.1	12	6.79
	Arg_inalterada	0.102	0.1	12	0.164	0.1	12	6.21
11	Coluvial	0.100	0.1	12	0.103	0.1	12	6.37
	Arg_inalterada	0.103	0.1	12	0.164	0.1	12	6.03

Nota: La presión de gas y la temperatura se mantiene constante.

### **Condición de contorno para el flujo**

Para resolver el balance de agua en la fase líquida se requiere establecer las condiciones de contorno en el modelo. En la Figura 67 se presenta las condiciones de contorno de flujo impuestas en Code\_Bright.

En la base del modelo, la presión del gas es prescrita 0.1 MPa, con gamma de 1.0E+06 y constante para todos los bloques. También, para prescribir la temperatura en la base se ha asumido 12°C, con gamma 1.0E+05 y constante en todos los bloques. Sin embargo, la condición de presión de líquido varía en cada bloque (Ver Tabla 37) y con gamma para líquido 1.0E+06. El gamma positivo permite la entrada o salida en función de la presión en el punto calculado.

**Tabla 37:** Valores de presión de líquido prescrito en la base del modelo 2D.

Bloque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Presión de líquida prescrita [MPa]</b>	0.222	0.217	0.212	0.205	0.196	0.188	0.181	0.172	0.167	0.164	0.164

En la parte superior del modelo se aplica la condición de flujo atmosférico donde intervienen diferentes variables, a continuación, se describe con mayor detalle.

### *Condición de contorno atmosférico*

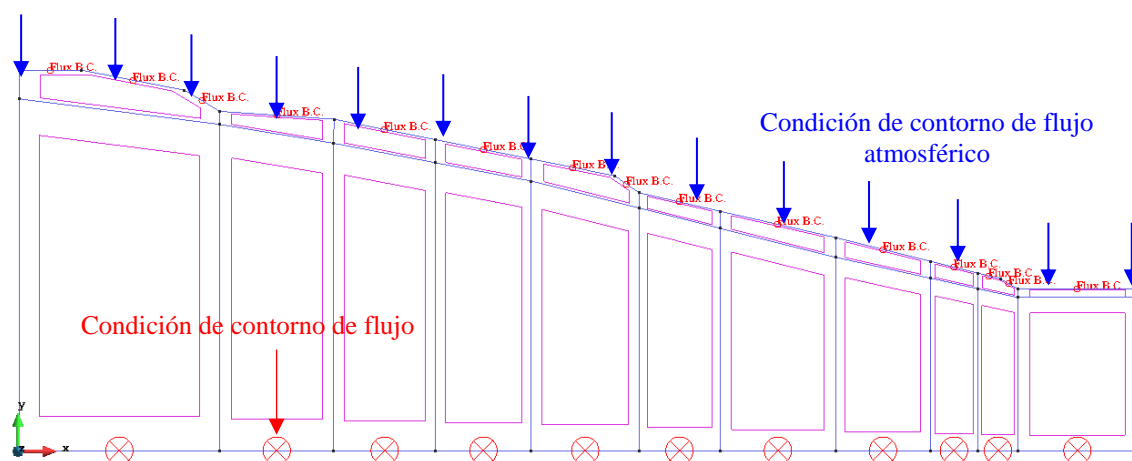
Para ambos modelos 1D y 2D se ha impuesto la condición de flujo atmosférico. En el modelo 1D se ha impuesto en la parte superior de la columna; mientras en el modelo 2D se ha impuesto a lo largo del perfil longitudinal a un conjunto de líneas que forma la superficie ver la Figura 67. Todos los parámetros de condición de contorno atmosférico se encuentran detallada en la Tabla 38.

Por otra parte, para ambos modelos la variable de latitud corresponde a la ubicación de la zona de estudio (Cercs). La altura de la rugosidad principal de la superficie fue asumida 0.2m según el criterio de Chow et al. (1988), debido a que la zona cuenta con vegetación (árboles 1 a 2m de altura). El albedo es asumido de acuerdo a la literatura de 0.20 a 0.25, para zona vegetada. La orientación y la inclinación de la ladera solo es considerada para el modelo 2D. El factor de vegetación no se ha considerado en ambos modelos.

**Tabla 38:** Definición de condición de contorno atmosférico.

Condiciones de contorno atmosférica	Variable	Unidad	Ladera Cercs
Latitud	$\lambda$	[rad]	0.735582557
Tiempo cuando inicia el otoño	$t_s$	[S]	14947200
Tiempo al medio día	$t_m$	[S]	43200
Altura de rugosidad principal de la superficie	$Z_0$	[m]	0.2
Altura de medición del viento	$Z_a$	[m]	2.00
Factor de estabilidad	$\phi$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1.00
Densidad del gas atmosférico	$\rho_{sa}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1.20
Albedo seco	$A_d$	[-]	0.25
Albedo húmedo	$A_w$	[-]	0.20
Coeficiente de almacenamiento de gas	$\gamma_g$	[kg.m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	1.00E+06
coeficiente de almacenamiento de líquido	$\gamma_l$	[kg.m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	-1.00E+06
Factor de lluvia	$K_{rain}$	[-]	1.00
Factor de radiación	$K_{rad}$	[-]	1.00
Factor de evaporación	$K_{evap}$	[-]	1.00
Dip (inclinación de la ladera)	$\theta$	[rad]	0.349
Strike (Orientación)	$\sigma$	[rad]	2.356
Tipo de radiación	$T_{rad}$	[-]	3.00
Fracción de vegetación	$F_{veg}$	[-]	0.00

Nota: Los parámetros presentados en la tabla 38, ingresa en el subgrupo 20 en el archivo root\_gen.dat.



**Figura 67:** Condición de contorno del flujo en la base y en la parte superior condición atmosférica.

Por otra parte, las variables atmosféricas que se muestran en la Tabla 39 son registros provenientes de campo, que requiere el código de Code\_Bright. Para ello, se ha creado un archivo adicional en formato ASCII llamado *Modelo\_FINAL\_atm.dat* (el nombre varía de acuerdo al nombre de la carpeta del modelo). En este archivo se encuentra los datos atmosféricos que varían en función del tiempo en días desde 2015 al 2018. Estas variables son requeridas para calcular los flujos de masa y calor.

**Tabla 39:** Definición de condición de contorno atmosférico.

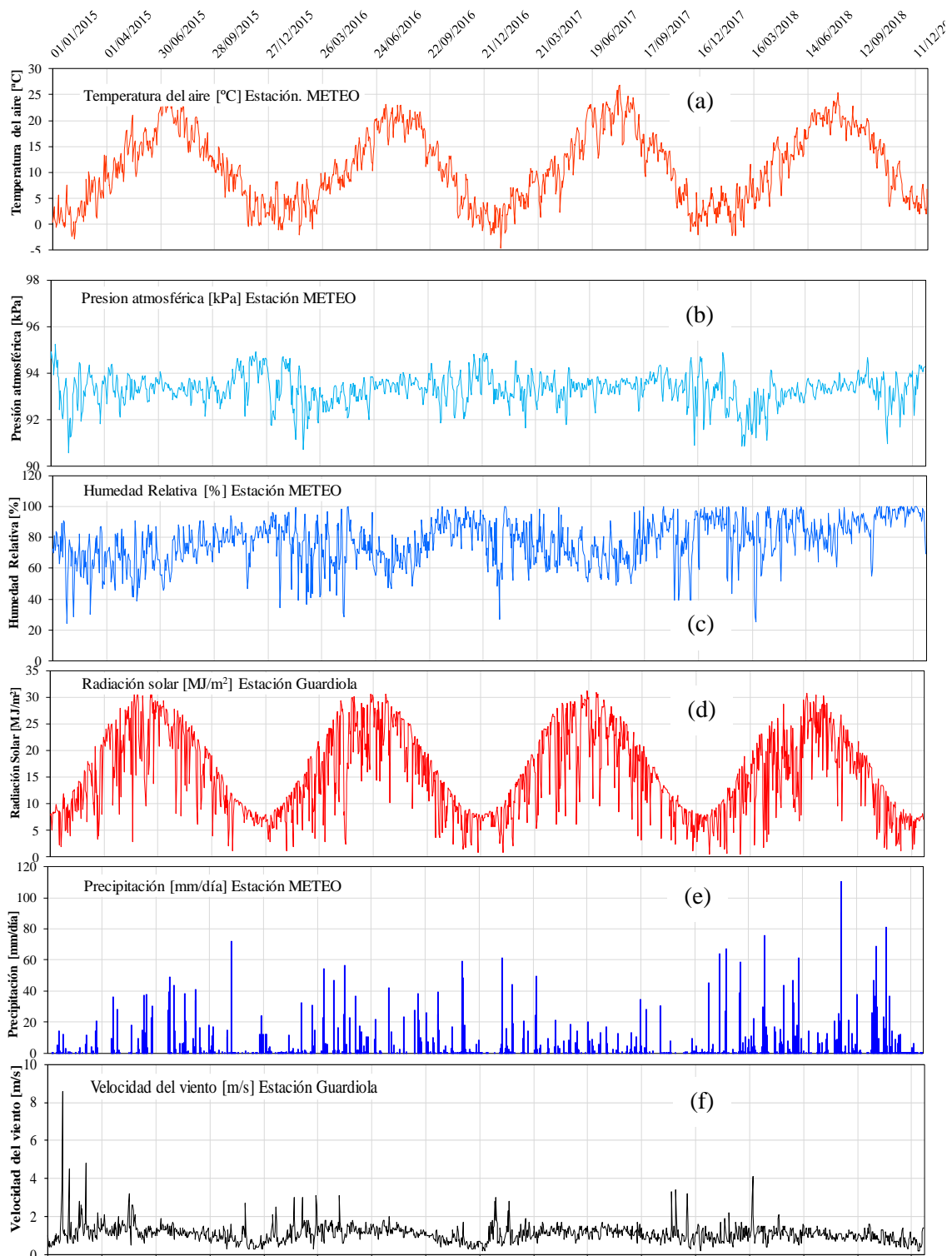
Parámetro	Variable	Unidad
Temperatura atmosférica	$T_a$	$^{\circ}\text{C}$
Presión de gas atmosférica	$P_{ga}$	MPa
Humedad relativa	$H_r$	-
Radiación	$R_n$	$\text{J.M}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Índice de nubosidad	$I_n$	-
Precipitación	$P$	$\text{Kgm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Velocidad del viento	$v_a$	$\text{m.s}^{-1}$

Nota: Las unidades de las variables se establece de acuerdo al manual de Code\_Bright.

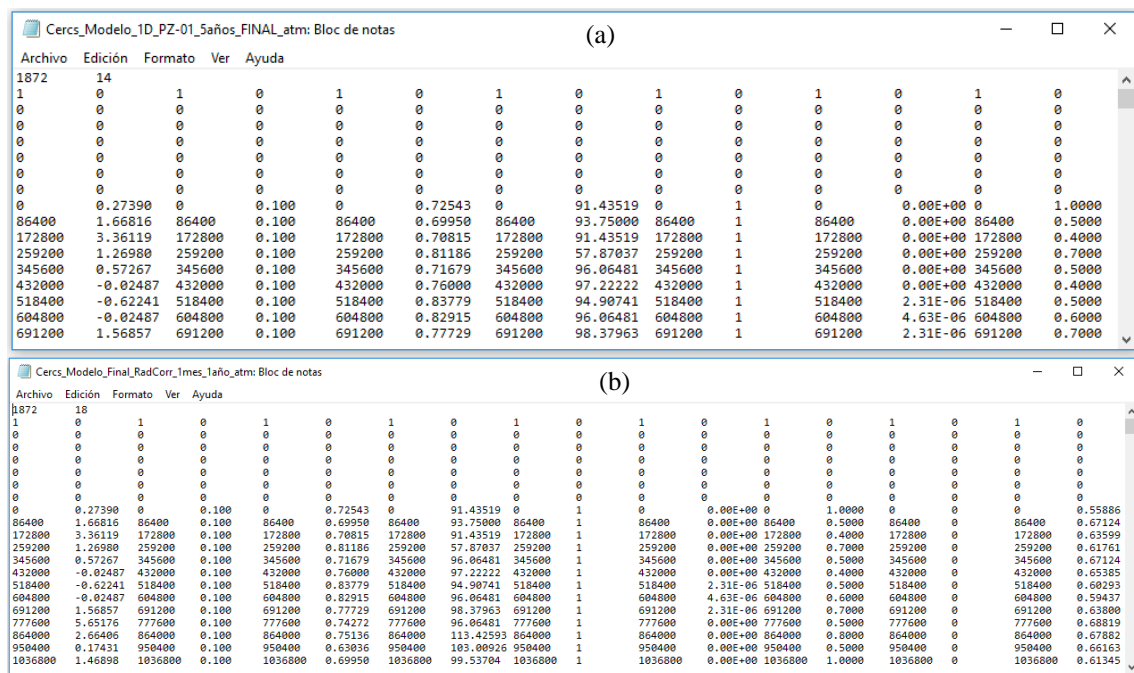
Por un lado, las variables se organizan de acuerdo al formato preestablecido por Code\_Bright; donde se incluye para cada variable una columna de tiempo. En la Figura 69(a) se muestra el fichero de los datos atmosféricos para el modelo 1D, con 14 columnas y 1872 filas. Mientras, en la Figura 69(b) se muestra el fichero de datos atmosféricos para el modelo 2D, con 18 columnas y 1872 filas. El archivo creado se coloca en la carpeta del modelo con el mismo nombre de la carpeta seguido por *\_atm.dat*.

Para el modelo 2D se ha adicionado dos variables fracción de insolación y transmisividad atmosférica. Para fracción de insolación se ha considerado un valor constante de cero; mientras, la transmisividad atmosférica ha sido calculada a partir de una fórmula empírica de Hargreaves and Allen (2003).

Las variables atmosféricas como: temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa, radiación, índice de nubosidad, precipitación y velocidad del viento; han sido registradas en la estación METEO que se sitúa en la zona de estudio, excepto las variables de radiación y velocidad del viento han sido consideradas de la estación meteorológica de Guardiola que se encuentra cerca de la zona de estudio. Todas las variables atmosféricas para el modelo se encuentran representadas en la Figura 68.

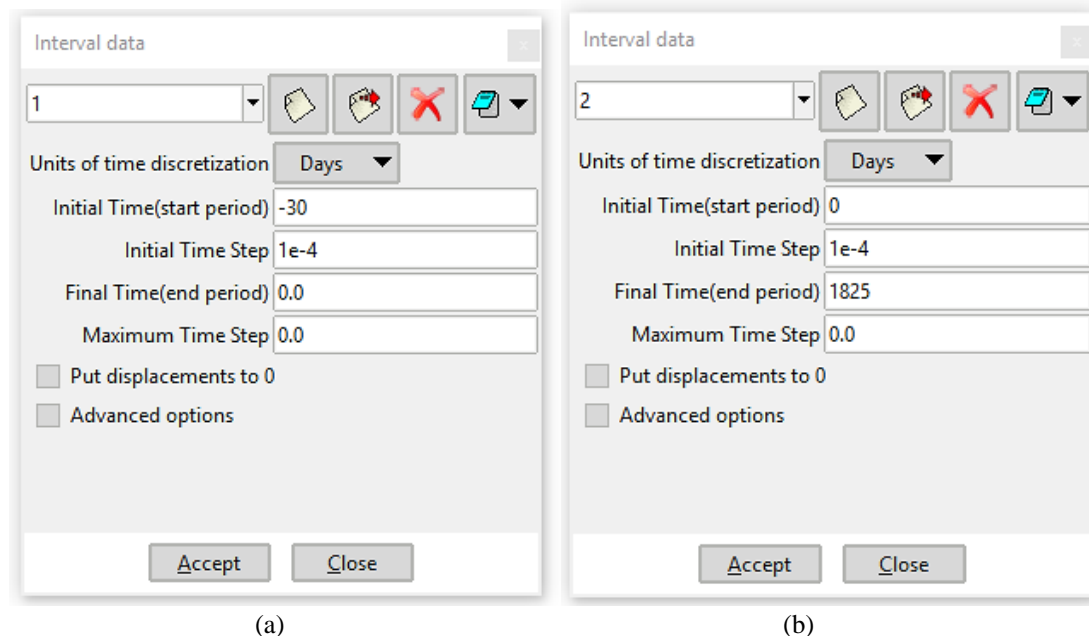


**Figura 68:** Datos atmosféricos durante el período 2014 al 2018 representado por día. (a) Temperatura del aire promedio. (b) Presión atmosférica. (c) Humedad relativa. (d) Radiación solar media. (e) Precipitación pluvial y (f) Velocidad del viento.



### 6.4.5 Intervalo de datos

En este trabajo de investigación la discretización del tiempo se estableció en días. La simulación se realiza para 4 años el cual corresponde desde 2015 al 2018; expresados en días resulta 1460 días. Pero, para lograr la estabilidad en los cálculos el año 2015 se ha repetido, por ende, resulta 1825 días como se observa en la Figura 70. Para ambos modelos (1D y 2D) se ha definido dos intervalos de datos (Figura 70 a y b).



El primer intervalo es para la aplicación de condiciones iniciales (porosidad, Unknowns) y condición de contorno de tipo flujo. Durante este período de tiempo (-30 a 0) se establece el balance entre variables y los parámetros que representan el estado de tiempo  $t=0$ .

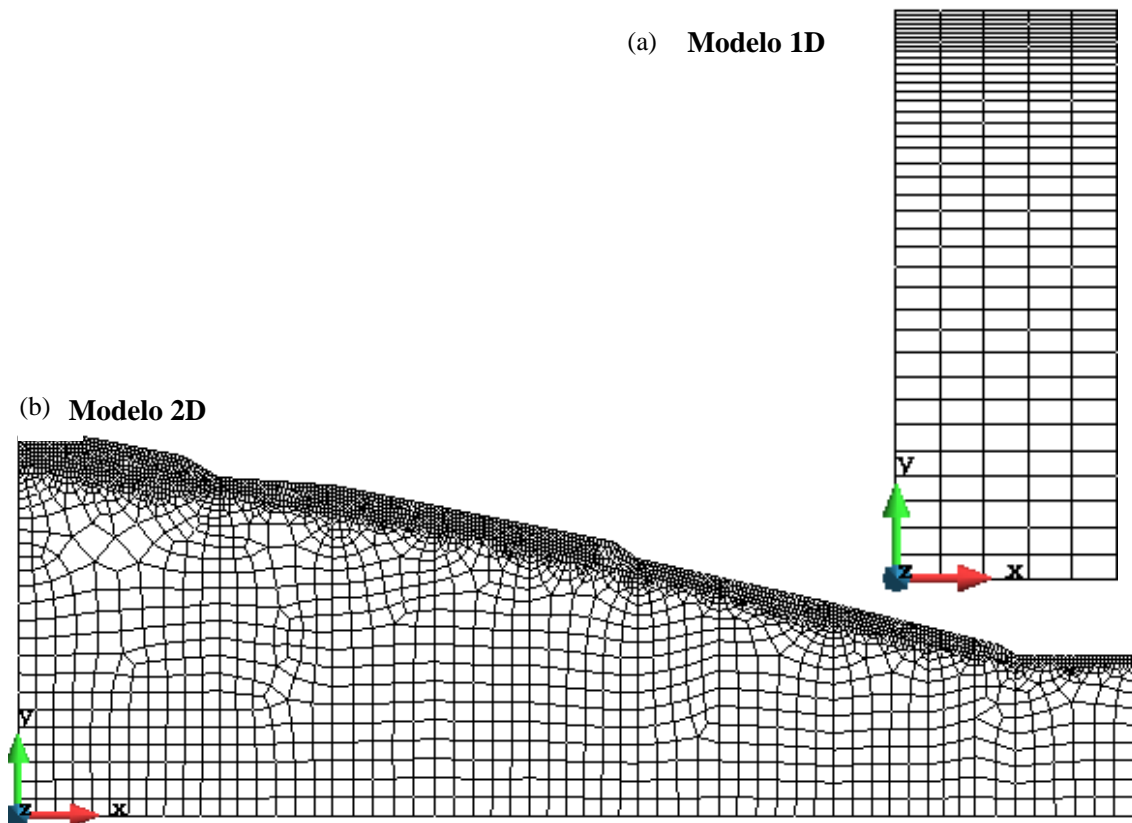


El segundo intervalo interactúa con los efectos atmosféricos. Para ello, se ha definido el tiempo inicial  $t=0$  y tiempo final  $t=1825$ , la unidad de discretización en días.

#### 6.4.6 Malla de elementos finitos

Para el modelo unidimensional 1D la malla de elementos finitos se ha establecido de forma estructurada empleando el tipo de elemento cuadrilátero. El modelo se compone de 240 nodos y 195 elementos; los cuales, se encuentran distribuidos en 39 filas (de espesor 0.1 a 1.0 m) y 5 columnas (de espesor 1.0m). El refinamiento de la malla se ha aplicado en la parte superior con espesor de 0.10 m, ver la Figura 71 (a).

Mientras, para el modelo bidimensional 2D la malla de elementos finitos se ha establecido de forma no estructurada, debido a que la geometría de la ladera es irregular; por ende, no forma cuadrados perfectos durante el proceso de mallado. En consecuencia, el modelo se compone de 3196 elementos de tipo cuadrilátero (no estructurado) y 3401 nodos. El refinamiento se ha realizado en la primera capa del modelo, en donde el tamaño de los cuadriláteros se ha definido a 0.10 m; mientras la capa inferior el tamaño de cuadriláteros fue definido a 1.0 m, Figura 71 (b).



**Figura 71:** Generación de la malla de elementos finitos. (a) Modelo 1D. (b) Modelo 2D.

Después de completar la generación de la malla de elementos finitos se realizó el cálculo y luego el post-procesamiento para visualizar los resultados. A continuación, se detalla los resultados obtenidos mediante la modelización.

## **6.4.7 Resultados y análisis de la modelación**

En este ítem se presenta los resultados de la modelación para 48 meses (cuatro años) que corresponde desde enero del 2015 a diciembre del 2018. Las variables simuladas son tres: la temperatura en el suelo (T), la variación de contenido volumétrico de agua (VWC) y la variación de presión de líquido ( $P_l$ ). Los resultados de la modelación serán contrastados con los registros de auscultación geotécnica in situ.

### **6.4.7.1 Temperatura**

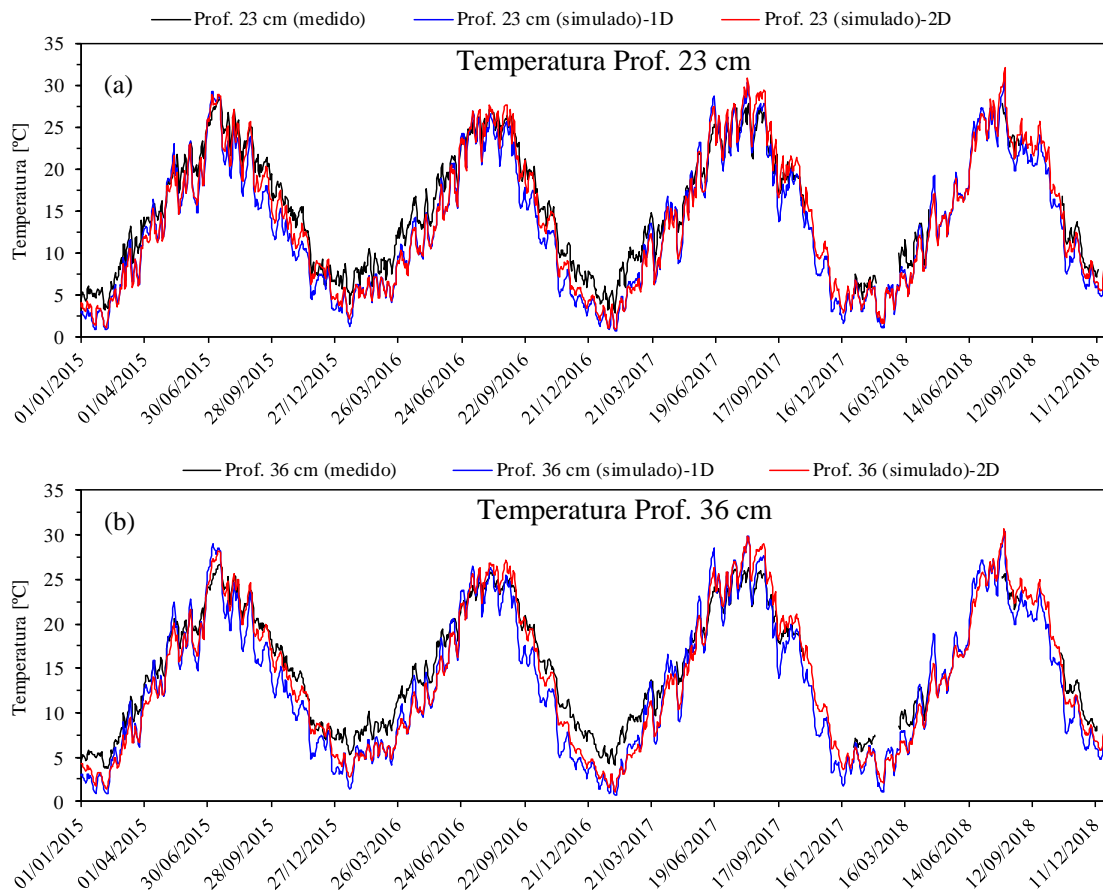
La radiación solar es la principal fuente de energía para que exista la transferencia de calor en la interacción entre suelo-atmósfera. Por ello, la medida de radiación solar tiene gran interés en la modelación. Los registros de radiación solar fueron considerados de la estación meteorológica de Berguedà situada a 10 km de la zona de estudio.

En la modelación se plantea dos modelos. El primer modelo unidimensional 1D no tiene en cuenta la corrección por radiación solar y el efecto de transmisividad atmosférica. Por ende, solo se aplica sobre un plano horizontal. Sin embargo, el segundo modelo bidimensional 2D tiene en cuenta la corrección de la radiación solar e incluye el efecto de transmisividad atmosférica. La corrección de radiación solar se realizó de acuerdo a la orientación azimutal e inclinación de la ladera.

Los resultados de la temperatura del suelo obtenidos a partir de la modelización se han comparado con los datos de temperatura medidos con el sensor MPS-2 in situ, a 23 y 36 cm de profundidad respecto a la superficie. En la Figura 72 se presenta la evolución de la temperatura respecto al tiempo desde 2015 al 2018; en la cual, se observa que tiene buena tendencia entre simulado y datos medidos in-situ; pero si existe una pequeña diferencia entre ambas posiblemente porque las medidas de radiación fueron consideradas de una estación ubicada a 10 km.

La diferencia de temperatura que existe entre la simulación 1D vs medido in-situ es de 3 grados. Mientras la simulación en 2D con energía corregida la diferencia con datos medidos in-situ disminuye en un grado es decir presenta 2°C. Por tanto, se concluye que la corrección de la radiación solar y al añadir el efecto de transmisividad atmosférica influye en un grado de temperatura a 23cm de profundidad, ver la Figura 72(a).

Por un lado, la temperatura entre simulado y medido a 36cm de profundidad existe buena tendencia con diferencias que existen entre 1 a 2.4 °C. Pero, en la estación de invierno muestra una diferencia que existe en ellas hasta 4°C, ver Figura 72(b). Esta discrepancia también es debido a que el instrumento que mide la radiación no se encuentra en el lugar de estudio.



**Figura 72:** Comparación de temperatura del suelo simulada (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 en la ladera de Cercs. (a) Temperatura a 23 cm de profundidad y (b) a 36 cm de profundidad.

#### 6.4.7.2 Contenido volumétrico de agua

La masa deslizada en la ladera de Cercs ha sido auscultada mediante tres sensores de 10HS para medir el contenido volumétrico de agua a 11, 23 y 36cm respectivamente respecto a la superficie del terreno. El objetivo de la modelación fue para contrastar la evolución del contenido volumétrico de agua para 48 meses (4 años) 2015 a 2018.

El modelo calcula el grado de saturación a partir de datos intrínsecos del suelo, condición atmosférica y condición de flujo. La evolución de grado de saturación calculada a partir del modelo numérico se ha transformado a contenido volumétrico de agua [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] para comparar con los datos medidos in-situ, para ello se ha considerado la porosidad de 0.38.

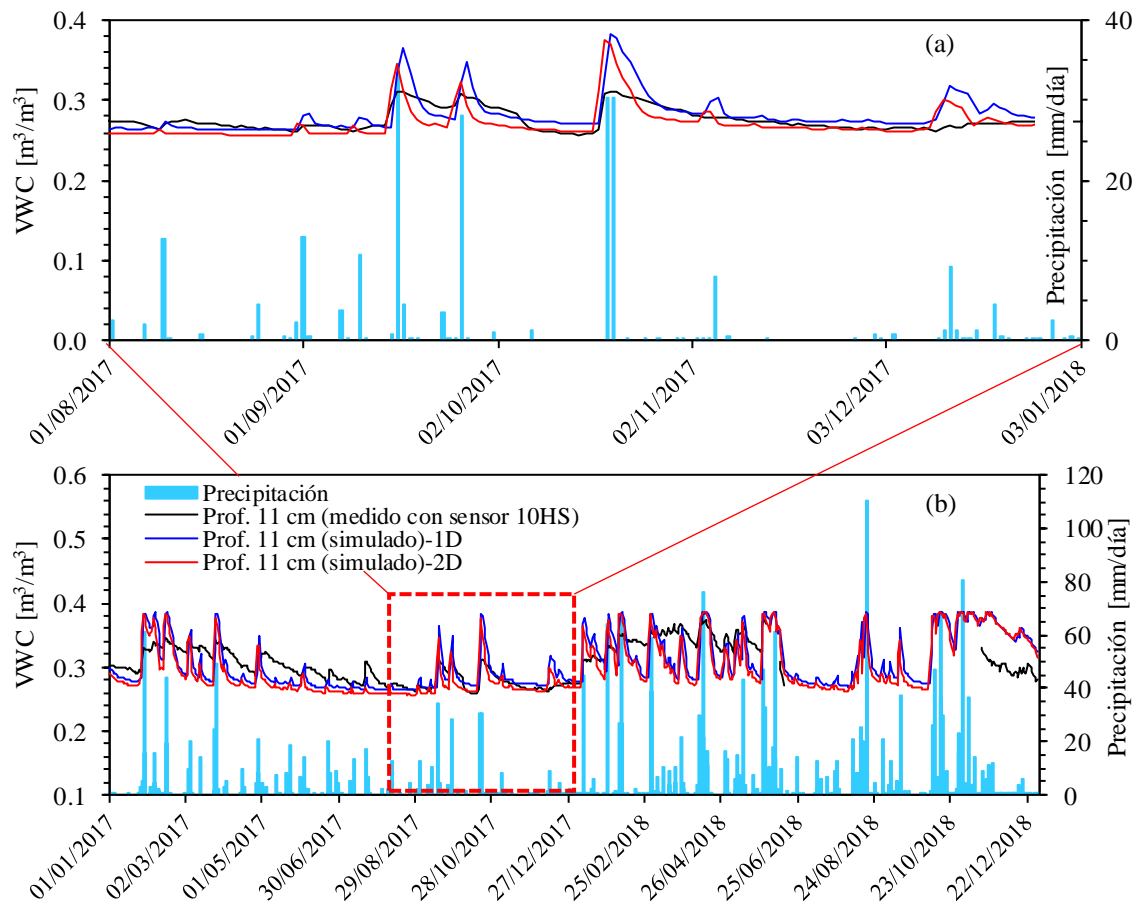
En la Figura 73 se compara el contenido volumétrico de agua registrado del sensor 10HS situado a 11cm de profundidad vs los resultados obtenidos de modelo (1D y 2D). En el cual se observa de forma general que tienen buena tendencia entre el modelo y los datos de campo. Sin embargo, a finales de diciembre del 2018 existe la discrepancia entre simulado vs medido, con una diferencia de  $0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de contenido volumétrico de agua, expresado en función de grado de saturación comprende el 5%.

Por un lado, el tiempo de respuesta del suelo ante las precipitaciones entre el modelo y los registros del sensor 10HS coinciden, es decir el agua producto de la lluvia se infiltra de forma rápida produciendo el proceso de humedecimiento. No obstante, cuando deja de llover y existe la acción de radiación solar, el suelo empieza a perder agua mediante la evaporación e inicia el proceso de secado, aquí el sensor nos muestra que demora entre 5 a 6 días aproximadamente;

mientras el modelo simula 3 a 4 días. Esta diferencia, es debido a que al modelo se le asignó en el índice de nubosidad completamente despejado, pero en realidad el ambiente es muy complejo, puede haber nubosidades en horas o minutos.

En conclusión, el modelo simula bien el contenido volumétrico de agua a 11cm de profundidad. La variable que controla es la precipitación y la radiación. En la siguiente figura se muestra la evolución del contenido volumétrico de agua.

El sensor que registra a 11cm de profundidad tiene el comportamiento muy sensible a los cambios de precipitación y radiación solar. La fluctuación de contenido volumétrico de agua varía en 0.28 a 0.38 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].



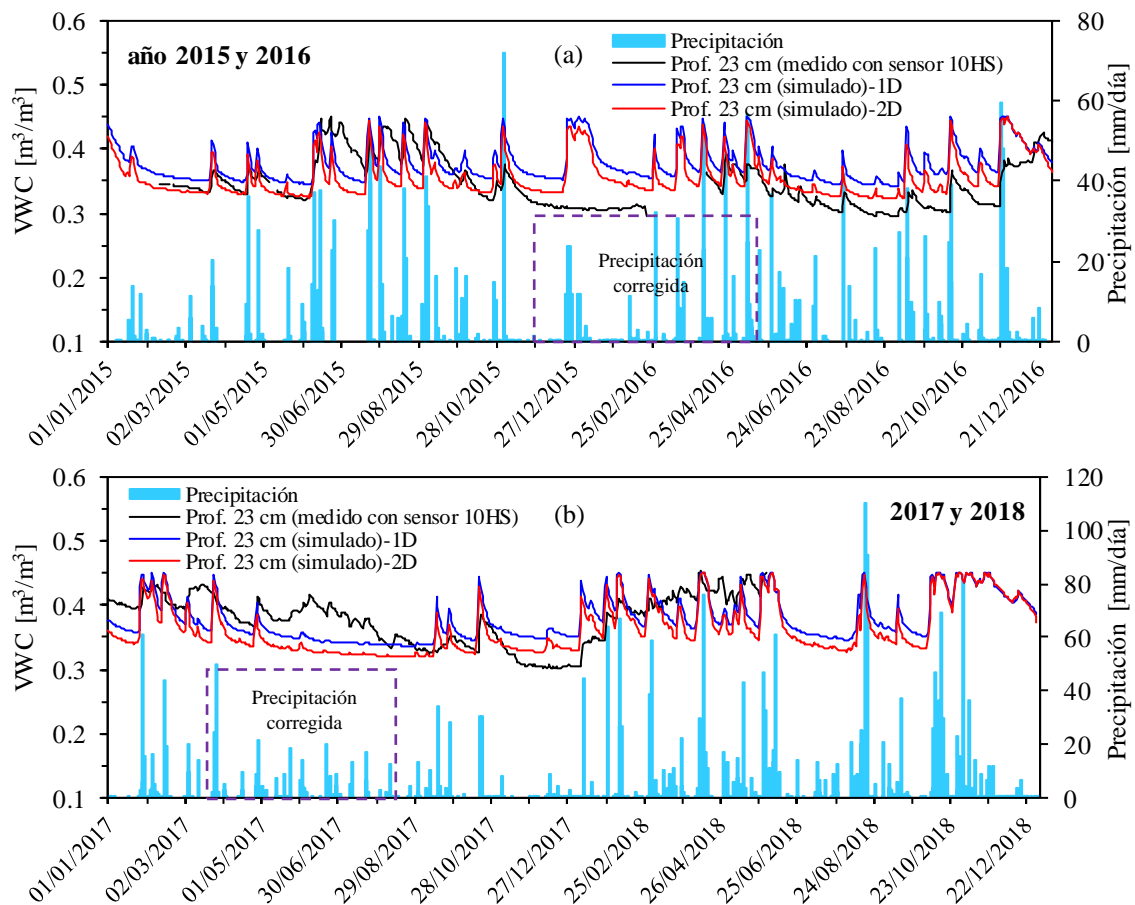
**Figura 73:** Comparación de VWC simulado (1D y 2D) vs medido a 11cm de profundidad con el sensor 10HS en la ladera de Cercs en 2017 y 2018.

En la Figura 73(a) se muestra los resultados con detalle del modelo (1D y 2D) y registros del sensor 10HS. La tendencia es buena entre ambas. Pero el modelo 2D es la que mejor se ajusta a los datos del sensor 10HS. Esto debido a que toma en cuenta la corrección de radiación solar de acuerdo a la orientación e inclinación de la ladera.

En la Figura 73(b) se observa el resultado entre el modelo y los datos de 10HS que no coinciden desde 01 de enero al 30 de junio del 2018, parece tener problemas el sensor porque no muestra proceso de secado y mojado ante la precipitación.

En la Figura 74(a y b) se muestra la evolución de contenido volumétrico de agua desde 2015 al 2018 a 23 cm de profundidad. La comparación del modelo (1D y 2D) y los datos registrados con

el sensor 10HS, resulta una tendencia regular. Aunque en algunos períodos resulta entre el modelo y datos de campo con variaciones de  $0.05 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$  de VWC.

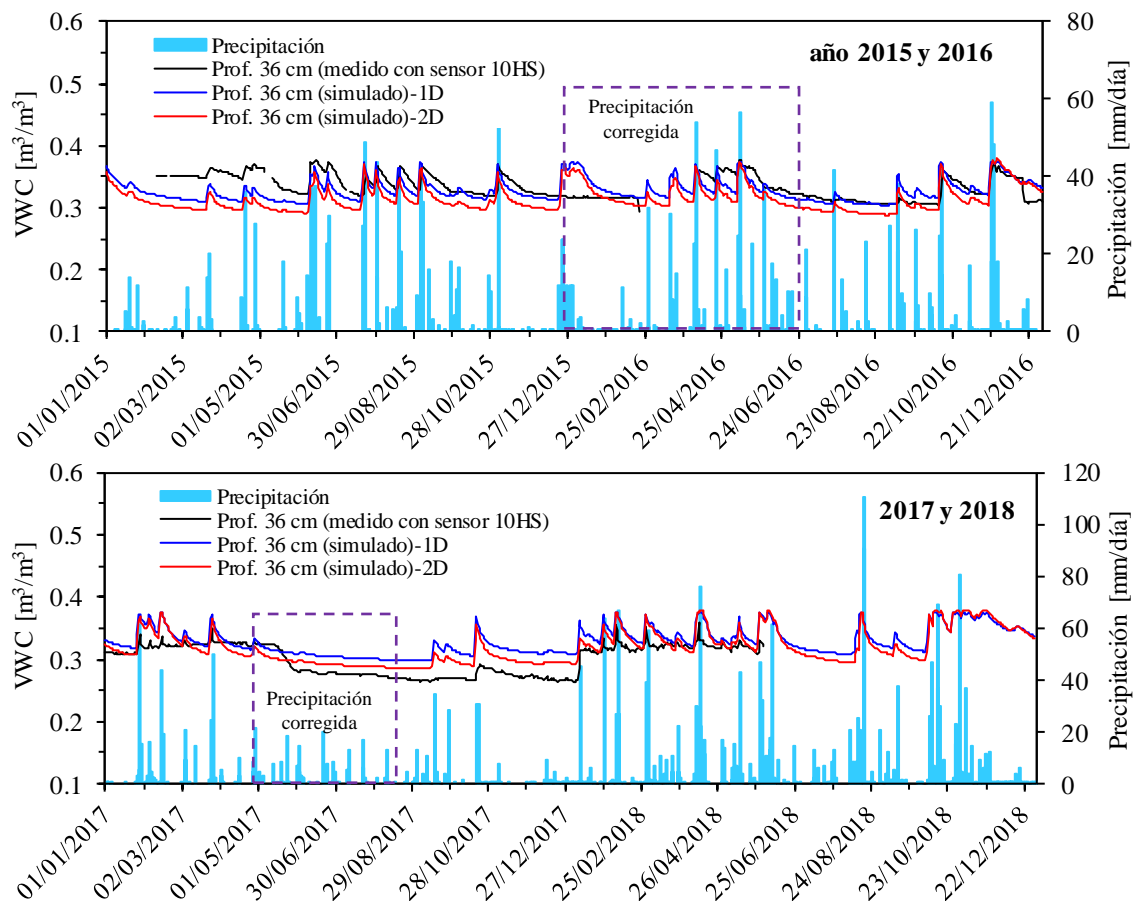


**Figura 74:** Comparación de VWC entre simulado (1D y 2D) vs dato medido con el sensor 10HS a 23cm de profundidad. (a) VWC 2015 y 2016. (b) VWC 2017 y 2018.

Por otra parte, el contenido volumétrico de agua es afectado fuertemente por la precipitación pluvial y radiación, en la Figura 74(a y b) se observa claramente cuando los datos de precipitación han sido completados a partir de la estación meteorológica de Berguedà situada a 10 km; resulta que no se correlaciona entre la precipitación y los datos de contenido volumétrico de agua registrados con el sensor en la zona de estudio. Por lo tanto, cuando se realiza la comparación entre simulado vs medido no existe buena tendencia en este período. Mientras, la simulación en Code\_Bright calcula el grado de saturación del suelo en base a los datos de precipitación ingresado. Finalmente, se puede concluir que el modelo 2D es el que mejor ajuste mantiene hasta esta profundidad.

En la Figura 75(a y b) se presenta la evolución de contenido volumétrico de agua desde 2015 al 2018 a 36 cm de profundidad. La comparación del modelo (1D y 2D) y los registros del sensor 10HS tiene buena tendencia. Además, a esta profundidad las oscilaciones de VWC son menores, por ende, los resultados de simulación dieron poca diferencia entre el modelo 1D y 2D.

La precipitación corregida a 36 cm de profundidad tiene poca influencia respecto a los 23 cm de profundidad. También, el tiempo de respuesta del suelo ante los procesos de mojado y secado, resultan idénticos entre datos del sensor y la simulación en Code\_Bright. Se puede concluir que existe buena tendencia entre medido vs simulado.



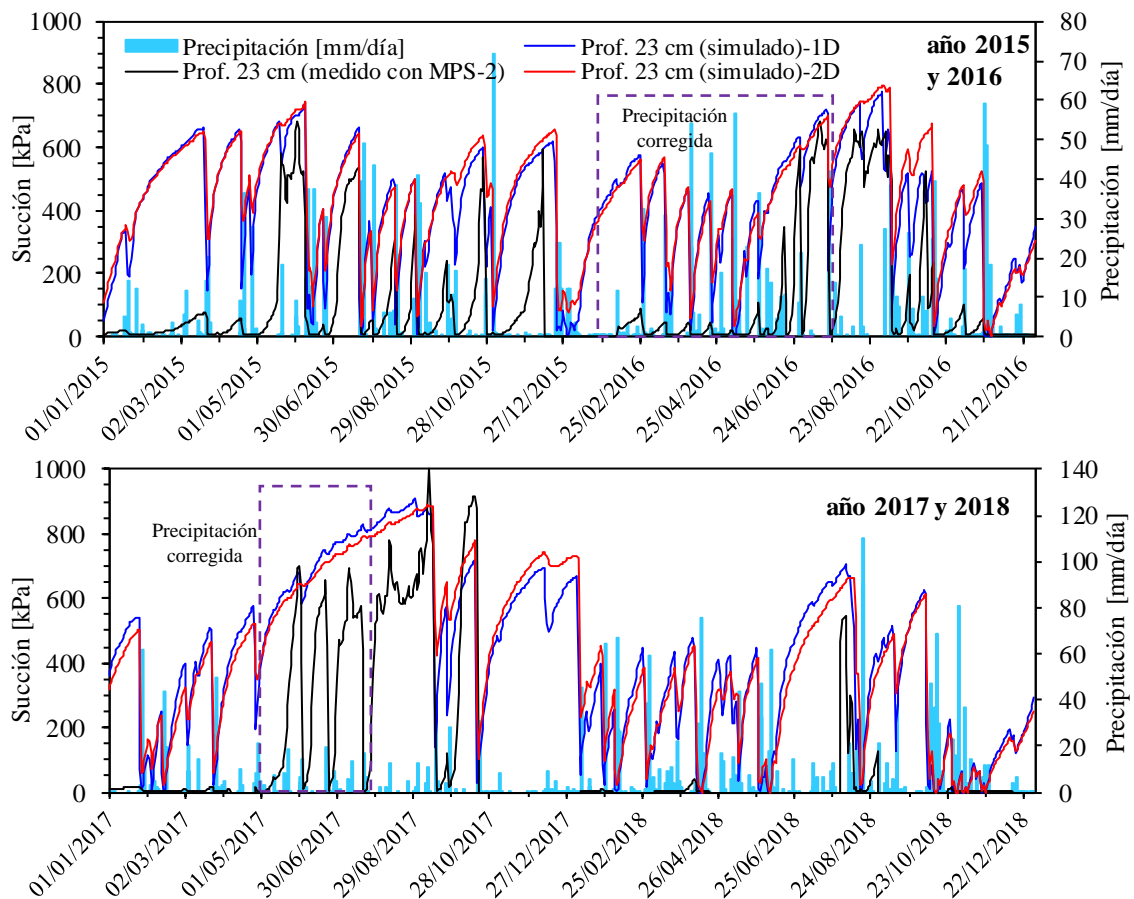
**Figura 75:** Comparación de VWC entre simulado (1D y 2D) vs dato medido con el sensor 10HS a 36 cm de profundidad. (a) VWC 2015 y 2016. (b) VWC 2017 y 2018.

#### 6.4.7.3 Presión de líquido

La presión de líquido a distintas profundidades del terreno es calculada a partir de la modelización numérica en Code\_Bright; la cual se basa en resolver la ecuación de balance de masa de agua en función de condiciones de contorno impuesta; tales como, la condición de flujo y la condición atmosférica que varía con el tiempo. En este trabajo se ha preparado dos modelos. El primero consiste en un modelo unidimensional 1D y el segundo modelo representa a la ladera de Cercs construido en geometría bidimensional 2D a escala real. En ambos modelos se ha definido la altura piezométrica de acuerdo a lo proporcionado por el piezómetro de cuerda vibrante.

Por un lado, la zona de estudio cuenta con dos sensores MPS-2 que miden el potencial hídrico a 23 y 36 cm de profundidad desde 2015 a 2018. El objetivo de la modelación fue para comparar los datos medidos vs simulado. Los resultados obtenidos de la modelización en Code\_Bright proporcionan directamente la presión de líquido en absolutas, es decir tomando en cuenta la presión atmosférica ( $P_g$ ) 0.1 MPa. Mientras, los registros de campo son expresados en potencial hídrico o succión. Para transformar la presión de líquido ( $P_l$ ) a succión matricial se ha utilizado esta ecuación:  $Succión = P_g - P_l$ .

En la Figura 76 se presenta la evolución de succión medida y simulada a 23 cm de profundidad, en la cual se puede deducir que, en los primeros 4 meses de cada año existe una discrepancia grande entre medido vs simulado. Por un lado, en verano la succión alcanza sus valores máximos entre 600 a 800 kPa, este comportamiento se da en los 4 años analizados. Además, los datos medidos vs simulados en Code\_Bright resultan coherentes.



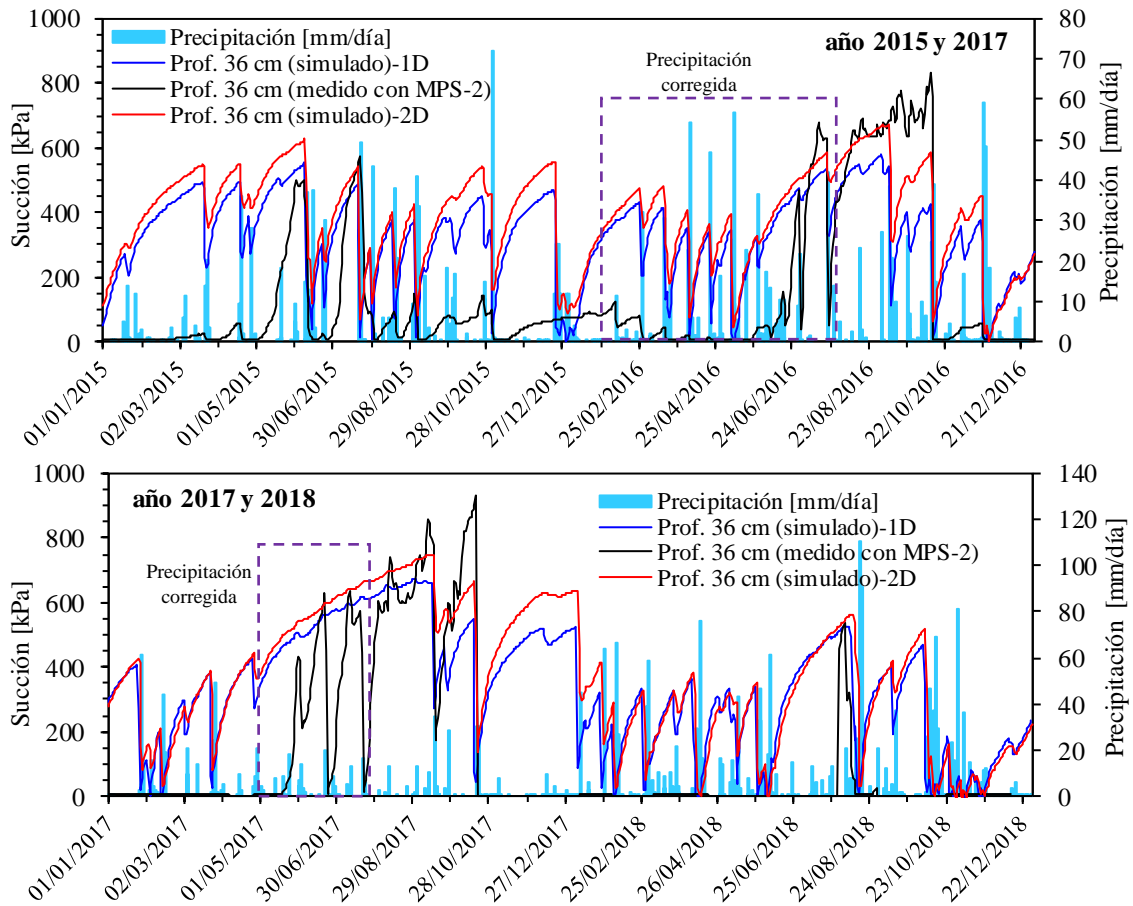
**Figura 76:** Comparación de succión entre el modelo (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 a 23cm de profundidad. (a) Succión 2015 y 2016. (b) Succión 2017 y 2018.

De forma general en la Figura 76 y Figura 77 se puede observar dos tendencias bien definidas: 1) cuando se produce la lluvia con intensidades mayores a 30 mm/día, se produce la infiltración al suelo; por tanto, se reduce considerablemente la succión alcanzando sus valores mínimos de 5 a 10 kPa respectivamente y 2) cuando la precipitación disminuye muy por debajo de 30 mm/día, la succión aumenta.

Además, en la Figura 76 y Figura 77 se muestra claramente la influencia de la lluvia y la radiación solar. Se puede deducir que cuando más cerca está a la superficie las fluctuaciones son mayores, mientras profundiza disminuye estos cambios bruscos de humedecimiento y secado. Por otra parte, queda claro cuando los datos de precipitación son asumidos o estimados a partir de correlaciones a partir de otras estaciones meteorológicas, los resultados de succión medido vs simulado tienen grandes variaciones.

En la Figura 77 se presenta la evolución de succión medida con el sensor vs simulado a 36 cm de profundidad, la cual tiene un comportamiento muy parecido al anterior de 23cm de profundidad. También, en el verano la succión alcanza sus máximos valores entre 600 a 800 kPa, este comportamiento se da en los 4 años analizados.





**Figura 77:** Comparación de succión entre el modelo (1D y 2D) vs medido con el sensor MPS-2 a 36cm de profundidad. (a) Succión 2015 y 2016. (b) Succión 2017 y 2018.

#### 6.4.7.4 Cálculo de factor de seguridad

La resistencia al corte en suelos saturados se describe a partir de tensiones efectivas fue definida por Terzaghi (1936). Y la representación del criterio de rotura Mohr-Coulomb es mediante una recta (envolvente de rotura), definida por la ecuación clásica:  $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ . Sin embargo, para el caso de los suelos parcialmente saturados, existen varias publicaciones que describen la resistencia al corte para suelos no saturados; normalmente bajo dos variables de tensiones independientes: tensión neta y succión mátrica. Mediante, este concepto Fredlund et al. (1978) propone la ecuación:  $\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$ , asumiendo el ángulo de inclinación (tensión de corte-succión)  $\phi^b$  constante.

Existen otros criterios para definir la resistencia al corte que describen el comportamiento no lineal de la envolvente de rotura para suelos parcialmente saturados, estudiados por varios autores (Bao et al., 1998; Fredlund et al., 1996; Khalili y Khabbaz, 1998; Lamborn, 1986; Lu y Likos, 2004; Peterson, 1988; Vanapalli et al., 1996).

En este trabajo se hace especial énfasis en el criterio propuesto por Lu y Likos (2004) que se fundamenta en la generalización unificada para obtener la tensión efectiva en suelos saturado y parcialmente saturado, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma' = (\sigma - P_g) - \sigma^s \quad (87)$$

Donde:  $P_g$  es la presión de gas (aire);  $P_l$ , presión de líquido (agua);  $\sigma^s$ , es definido como la tensión de succión a partir de la curva característica del suelo en función de:

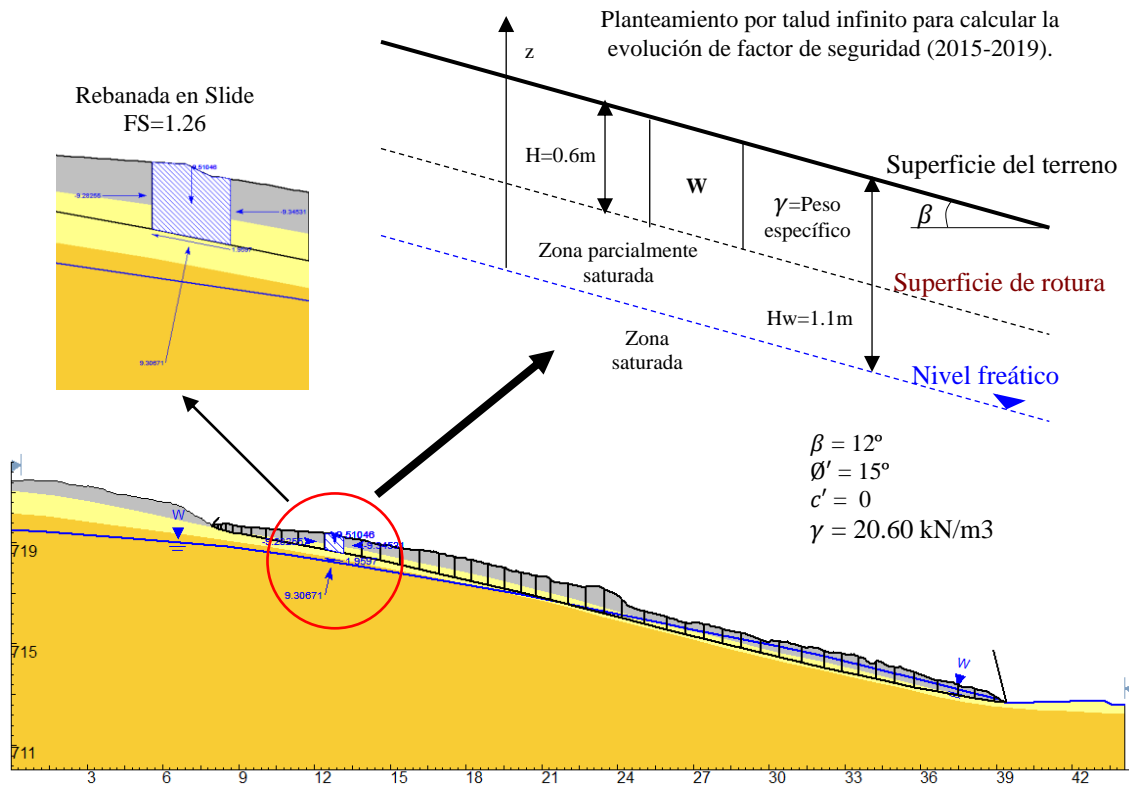
$$\sigma^s = -(P_g - P_l) \quad P_g - P_l \leq 0 \quad (89)$$

$$\sigma^s = f(P_g - P_l) \quad P_g - P_l > 0 \quad (90)$$

Donde,  $P_l$ , presión de líquido (agua);  $P_g$  es la presión de gas (aire);  $f$  es una función definido a partir de grado de saturación efectiva o contenido volumétrico de agua. Lu y Likos (2004) demostró obtener  $\sigma^s$  a partir de formulaciones matemáticas o ensayos de resistencia al corte, bajo la definición de tensión efectiva propuesta por Bishop (1959) con amplia evidencia experimental. La tensión de succión  $\sigma^s$  queda definida en términos de contenido volumétrico de agua o grado de saturación efectiva (Lu y Likos, 2004).

$$\sigma^s = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) = -\frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} (P_g - P_l) \quad (91)$$

Donde;  $\theta$  contenido volumétrico de agua;  $\theta_r$  contenido volumétrico de agua residual,  $\theta_s$  es el contenido volumétrico de agua máxima;  $S_l$ , grado de saturación;  $S_{ls}$ , grado de saturación máxima;  $S_{rl}$ , grado de saturación residual;  $P_g$ , presión de gas (aire);  $P_l$ , presión del líquido (agua); succión ( $P_g - P_l$ ).



**Figura 78:** Esquema del talud infinito para el cálculo de factor de seguridad en la ladera de Cercs.

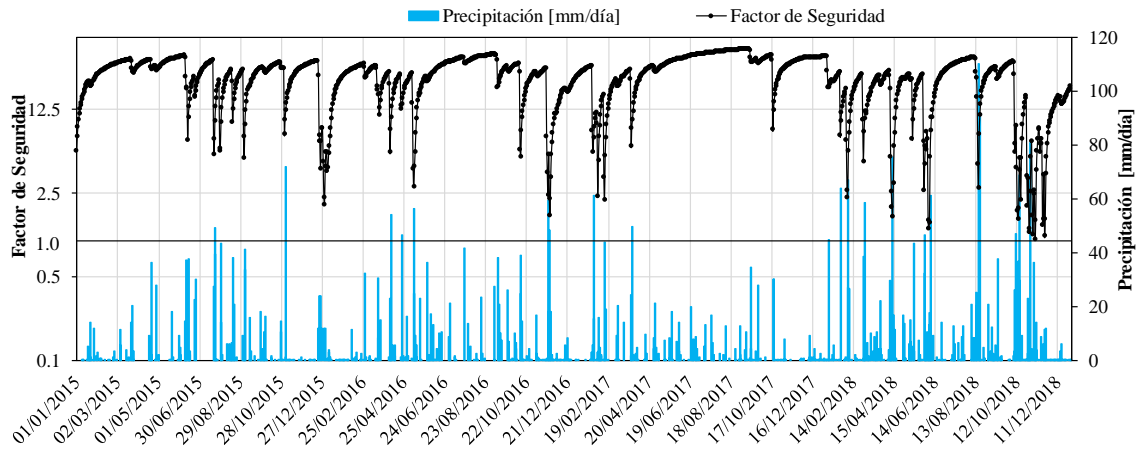
Para determinar el factor de seguridad de forma analítica mediante la definición clásica de talud infinito (ver Figura 78). Lu y Likos (2004) han modificado en la ecuación imponiendo la tensión efectiva generalizada para suelos saturados y no saturados  $\sigma' = (\sigma - P_g) - \sigma^s$ , en lugar de tensión efectiva de Terzaghi  $\sigma' = (\sigma - P_w)$ . Por lo tanto, la ecuación para calcular el factor de seguridad queda expresada de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' + [\gamma H \cos^2 \beta - \sigma^s] \tan \phi'}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \quad (92)$$

$$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{2c'}{\gamma H \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \phi' \quad (93)$$

Donde,  $c'$  y  $\phi'$  son parámetros del suelo cohesión y ángulo de fricción en efectiva en condición residual,  $\beta$  es la inclinación del talud,  $H$  es la profundidad donde se sitúa la superficie de rotura,  $\gamma$  es peso específico del material,  $\sigma^s$  es definido como la tensión efectiva a partir de la curva característica, considerando la succión y el grado de saturación.

Para calcular el factor de seguridad de forma analítica sobre la superficie de rotura existente, se ha considerado una rebanada de Slide como se presenta en la Figura 78. Para ello, se ha considerado los siguientes parámetros: cohesión nula, ángulo de rozamiento interno residual ( $\phi'$ ) de 15°, la profundidad de superficie de rotura 0.60m respecto a la superficie, peso específico del material 20.60 kN/m<sup>3</sup>, inclinación del talud ( $\beta$ ) de 12°, grado de saturación máxima ( $S_{ls}$ ) de 1.00; grado de saturación residual ( $S_{rl}$ ) de 0.55. En cambio, el grado de saturación ( $S_l$ ) varía en función del tiempo; ésta fue obtenida a partir de la simulación en Code\_Bright. También, la succión fue obtenida a partir de presión de líquido que varía en el tiempo. En la Figura 79 se presenta el resultado de la evolución de factor de seguridad desde 2015 al 2018.



**Figura 79:** Evolución de factor de seguridad por día desde 2015 al 2018.

De la Figura 79 se puede deducir que, cuando existen precipitaciones mayores a 50 mm/día existe una pérdida de resistencia al corte, debido al incremento de presión intersticial en los poros y el factor de seguridad disminuye. Sin embargo, cuando no hay precipitación o existe en menor proporción, los resultados de factor de seguridad resultan muy superiores a la unidad, esto nos da a entender que la succión contribuye a la resistencia. Finalmente, se concluye que el factor de seguridad mínimo calculado en los 4 años (2015 al 2018) resulta entre 1.03 a 1.16; este resultado es muy cercano al factor de seguridad determinado por el método de equilibrio límite en Slide (FS=1.14). Con esto se afirma que el análisis por equilibrio límite obtiene el FS para una condición más desfavorable.

## 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

### 7.1 Conclusiones

Los deslizamientos superficiales pueden ocurrir de manera repentina al incrementar las presiones intersticiales debido a la infiltración producto de la precipitación. Por ello, el deslizamiento superficial existente en la ladera de Cercs, se ha estudiado con el análisis geotécnico que abarca desde geología, auscultación y análisis de datos, ensayos de laboratorio, análisis de estabilidad por equilibrio límite y modelación termo-hidráulico para entender la interacción suelo-atmósfera. A continuación, se exponen las principales conclusiones deducidas del trabajo.

El cartografiado geológico-geomorfológico y sondeos manuales han permitido construir el modelo geológico a detalle en una sección longitudinal representativa, lo cual sirvió de base para el análisis de estabilidad por equilibrio límite y la modelización en Code\_Bright. Además, los sondeos han permitido definir tres capas que conforman la ladera (Coluvial, argilita alterada y argilita inalterada) y la superficie de rotura que se encuentra a 0.6 a 0.80m de profundidad respecto a la superficie del terreno.

La ladera estudiada cuenta con dos estaciones de monitoreo METEO y SLOPE. En la estación METEO se registra la temperatura de aire, presión atmosférica, humedad relativa y precipitación; mientras en la estación SLOPE se registra la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua, potencial hídrico, presión de poros y desplazamientos. Para este trabajo de TFM se ha ampliado la instrumentación, auscultando 2 nuevos piezómetros de cuerda vibrante y mejoramiento de sistema de adquisición de datos del sensor MPS-2. Los registros de los sensores se analizan desde enero del 2015 hasta abril del 2019, en este período observatorio se puede concluir como:

- La precipitación acumulada más alta se registró en el año 2018 de 1872.60 mm/año, el 16 de agosto registrado con mayor intensidad de lluvia con 110.40 mm/día.
- La temperatura del aire y suelo tienen comportamiento similar; es decir, en verano oscilan entre 20 a 30°C, mientras en invierno varían de -5 a 15°C.
- Los registros de contenido volumétrico de agua a 11, 23 y 36 cm de profundidad indican que el sensor intermedio registra mayor cantidad de agua 0.45 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].
- La evolución de succión está controlada por la precipitación y la radiación solar. Los mayores cambios observados se dan cerca de la superficie del terreno.
- La presión de poros registrados con piezómetro desde 2015 al 2019 resulta que en invierno registra la succión mientras en primavera registra el valor máximo 2.83 kPa.
- Las medidas de extensómetros de 2015 al 2018 no muestran desplazamientos considerables. Por lo tanto, se descarta el movimiento de la ladera.

Los ensayos de laboratorio han sido clave para completar la información obtenida de trabajos anteriores. Los resultados a los que se llegó son los siguientes:

- El coluvial tiene contenido de finos menores a 75%; mientras la argilita alterada y argilita inalterada tiene el contenido de finos mayores a 85%.
- El índice de plasticidad aumenta con la profundidad. Coluvial IP de 15%, argilita alterada 18% y argilita inalterada 29%.
- Mediante los ensayos de infiltrómetro, ensayos de permeabilidad por carga variable y edómetro (corte-directo), se ha estimado la conductividad hidráulica para coluvial de 2.91x10<sup>-8</sup>m/s, para argilita alterada de 5.65x10<sup>-9</sup>m/s y para argilita inalterada de 4.74x10<sup>-10</sup> m/s.

- Los ensayos de corte directo y corte anular han permitido estimar los parámetros resistentes. Mayor énfasis se ha puesto en la argilita alterada donde se encuentra la superficie de rotura; en la cual, resulta la cohesión nula y el ángulo de fricción residual 15°.

El modelo geológico, los registros obtenidos por el sistema de monitoreo (piezómetro-extensómetro) y la caracterización del material, han permitido realizar el análisis de estabilidad en un perfil representativo y se llegó a los siguientes resultados:

- Cuando la piezometría marca el nivel freático máximo entre 2015 a 2019, el factor de seguridad resulta 1.14 estable y éste se comprueba con las lecturas de extensómetro que no registró desplazamiento a lo largo del 2015 a abril del 2019.
- Mediante el análisis de sensibilidad el coluvión deslizado puede entrar en estado crítico o deslizamiento, cuando el nivel freático aumenta 30cm encima del nivel freático máximo registrado con piezómetro (2015-2019).
- Con el análisis retrospectivo se ha demostrado que la variación de nivel freático induce a cambios de ángulo de fricción residual entre 12. 8° a 20° para una condición estrictamente en equilibrio (FS=1). Sin embargo, en laboratorio el ángulo de fricción residual fue estimado 15°, este valor es representativo para la superficie de rotura en argilita alterada.

La modelación de interacción suelo-atmósfera realizado mediante el modelo numérico de elementos finitos en Code\_Bright para el acoplamiento de los procesos termo-hidráulico, han dado los siguientes resultados:

- La temperatura del suelo a 23 y 36cm de profundidad resultó congruente entre simulado vs medido con el sensor MPS-2. El modelo 2D es el que más se ajusta, ya que la radiación solar fue corregida acorde a la orientación e inclinación de la ladera.
- El contenido volumétrico de agua está controlado por la precipitación y radiación solar. Cuando los datos corresponden a las medidas in-situ; la simulación de contenido volumétrico de agua tiene muy buena tendencia respecto a los datos medidos con el sensor 10HS. Sin embargo, cuando se toma los datos de precipitación de estaciones cercanas resulta que existe discrepancia entre simulado vs medido.
- La succión es un parámetro difícil de reproducir en la simulación ya que reflejó discrepancias mayores entre simulado vs medido.

Finalmente, mediante distintos análisis tales como: observación directa de registros de desplazamiento horizontal, análisis de estabilidad por equilibrio límite y análisis de estabilidad en medio parcialmente saturado por método de talud infinito; han demostrado que el deslizamiento existente en Cercs se encuentra estable.

## **7.2 Líneas de trabajo futuras**

- Extender el modelo TH a THM, para ello se requiere realizar las siguientes tareas como: ensayos triaxiales en argilita, obtener la curva de retención en el laboratorio con trayectorias de humedecimiento y secado para convalidar la curva de retención obtenida en campo.
- Se recomienda auscultar sensores nuevos de succión MPS-2 y hacer seguimiento a los sensores auscultados.
- Se requiere nuevo estudio de análisis de datos registrados (2015-2019) a detalle, para establecer estadísticamente el tiempo de respuesta de saturación y secado para coluvial y argilitas.
- Se requiere un nuevo estudio sobre el análisis de riesgo para el acueducto, la torre de electricidad y la carretera.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods* (Second Edi.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Alonso, E. E. (2005). *Estabilidad de Taludes*. [portal.camins.upc.edu](http://portal.camins.upc.edu).
- Alonso, E. E., Pinyol, P. N. (2007). Parámetros de Diseño, Métodos de Cálculo y Solicitaciones. En *Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses* (pp. 45-117). Copy Center. Recuperado a partir de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/11086>
- Andrea, T., Friedel, S., Plötze, M., Springman, S. M. (2005). Combined approach for site investigation in terms of the analysis of rainfall induced landslides. En *Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering* (pp. 2591-2594).
- Aryal, K. P. (2006). *Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods*. Faculty of Engineering Science and Technology.
- ASM sensor. (2017). *POSIWIRE® Cable Extension Position Sensors, WS12 Position Sensor Datasheet*. Germany. Recuperado a partir de [https://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/ws12\\_en.pdf](https://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/ws12_en.pdf)
- Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 26(2), 221-233.
- Bao, C. G., Gong, B., Zhan, L. (1998). Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils. En *Keynote Lecture, Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 98)*. Beijing, China (Vol. 1, pp. 71-98).
- Bilz, P. (1995). Slope stability in partially saturated sandy soils. En *Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soil*. Paris, pp.257-264.
- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Norwegian Geotechnical Institute*, 106(39), 859-863.
- Boland, J., Ridley, B. (2008). Models of Diffuse Solar Fraction. En *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (pp. 193-219). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-77455-6\_8
- Bosch Sensortec. (2009). *BMP085 Digital pressure sensor Data sheet*. Germany. Recuperado a partir de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/BST-BMP085-DS000-05.pdf>
- Campbell Scientific. (2018). *HC2S3 Temperature and Relative Humidity Probe*. Recuperado a partir de <https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/hc2s3.pdf>
- Cedeño, R. R. (2014). *Caracterización, auscultación y estudio de un deslizamiento en el Pre-Pirineo (Poblado de Cercs)*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Corominas, J., García, A. (1997). Terminología de los movimientos de laderas. En *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 1051-1072). Granada, España.
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A., Gili, J. A. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, 2(2), 83-96.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27-29.
- Crunden, D. M., Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes, Special Report*, Transportation Research Board.
- Decagon Devices, I. (2015). *10HS Soil Moisture Sensor*. Recuperado a partir de <http://www.alphaomega-electronics.com/img/cms/pdf/Decagon/Manual-10HS.pdf>
- Decagon Devices, I. (2016). *MPS-2 & MPS-6 Dielectric Water Potential Sensors Operator's Manual*. Recuperado a partir de <https://www.edaphic.com.au/wp-content/uploads/2018/01/MPS-6-Manual.pdf>
- Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. (2019). *CODE\_BRIGHT User's Guide*. Universidad Politécnica de Catalunya-Barcelona Tech. España. Recuperado a partir de [https://deca.upc.edu/en/projects/code\\_bright/.../users.../CB\\_manual\\_2018-03\\_v7.7.pdf](https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/.../users.../CB_manual_2018-03_v7.7.pdf)

- Fellenius, W. (1936). Calculation of stability of earth dam. *Transactions. 2nd Congress Large Dams, Washington, D. C., 1936, 4*, 445-462.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), 313-321.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., Barbour, S. L. (1996). The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 440-448.
- Geosense. (2015). *Instruction Manual VW Piezometers*. Recuperado a partir de [https://measureitpdf.blob.core.windows.net/pdf/pdf\\_datablad/geosense/geosense\\_vwp-3000\\_manual.pdf](https://measureitpdf.blob.core.windows.net/pdf/pdf_datablad/geosense/geosense_vwp-3000_manual.pdf)
- Gonzalez de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Hargreaves, G. H., Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63.
- High Sierra Electronics Inc. (2016). *Instruction Manual SDI-12 Input to Analog Output Converter*. Recuperado a partir de <https://www.hsierra.com/download/manual-4015-00-sdi-12-input-analog-output-converter/>
- Highland, L. M., Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook-A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, p129.
- Hürlimann, M., Moya, J., Abanico, C., Vilajosana, I. (2013). Auscultación de Movimientos de Ladera para la Implementación de Sistemas de Alerta. Ejemplo del Pirineo y Prepirineo Central y Oriental. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 51-56.
- ICGC. (2018). Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. Recuperado a partir de <http://www.icc.cat/vissir3/>
- ICT International. (s. f.). High Resolution Rain Gauge. Recuperado a partir de <http://www.ictinternational.com/products/ecrn-100/high-resolution-rain-gauge/>
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations. *Publication of: Wiley (John) and Sons, Incorporated*.
- Kenney, T. C. (1967). The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils.
- Khalili, N., Khabbaz, M. H. (1998). A unique relationship of  $\chi$  for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, 48(5), 681-687.
- Lamborn, M. J. (1986). *A micromechanical approach to modeling partly saturated soils*. M.Sc. Thesis, Texas A&M University.
- Llorens, R. C., Masquef, A. T. (2009). Movimientos de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 284-294.
- Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley and Sons, Inc.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique*, 31(2), 181-213.
- Mosquera, A. C. (2017). *Análisis de la infiltración en suelos naturales. Aplicación a la ladera de Cercs en los Prepirineos*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Nash, D. (1987). A comparative review of limit equilibrium methods of stability analysis. *Slope Stability*, 11-75.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., Alonso, E. E. (1994). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in porous media*, 15(3), 271-293.
- Oorthuis, G. R. (2016, julio 22). *Diseño de un experimento a gran escala para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Pernía, S. C. (2015, junio 14). *Análisis de estabilidad de un deslizamiento superficial en Cercs*. Universidad



Politécnica de Catalunya.

- Peterson, R. W. (1988). Interpretation of triaxial compression test results on partially saturated soils. En *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*. ASTM International.
- Price, V. E., Morgenstern, N. R. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces.
- Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaaur, R. B., Leong, E. C., Fredlund, D. G. (2010). Response parameters for characterization of infiltration. *Environ Earth Sci*, 60, 1369-1380.
- Rocscience Inc. (2018). Slide 2018 2D Limit Equilibrium Analysis of Slope Stability. Toronto. Recuperado a partir de <https://www.roscience.com/software/slide2>
- Rodriguez, C., Guzmán, G. (2005). *Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos I Civ-219*. Universidad Mayor de San Simón.
- RPOUM. (2010). *Revisión del plan de ordenación urbanística municipal*. Cercs.
- Sánchez, F. J. (2011). *Ley de Darcy, conductividad hidráulica*. Recuperado a partir de <http://web.usal.es/javisan/hidroPág.1>
- Servicio Meteorológico de Cataluña. (2019). Dades agrometeorològiques - Ruralcat. Recuperado a partir de <https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions>
- Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*, 35(1), 3-18.
- Skempton, A. W., Hutchinson, J. N. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. *In Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/.*, pp 291-340.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- Suárez, D. J. (2009). Deslizamientos. Análisis Geotécnico. En *Cap. 1. Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos* (2009.<sup>a</sup> ed., pp. 1-35). Colombia.: División de Publicaciones Universidad Industrial Santander.
- Taylor, J. M., Burns, S. E. (2006). Slope and seismic stability of Castle Lake Debris Dam, Mt. St. Helens, Washington. *Mitochondrial Medicine*, 349.
- Terzaghi, K. (1936). The shear strength of saturated soils. En *Proc. 1St Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.(Cambridge, MA)* (Vol. 1, pp. 54-56).
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. *Application of geology to engineering practice, Geol. Soc. Am*, 83-123.
- Trabelsi, H., Hadrich, B., Guiras, H. (2018). Evaporation, shrinkage and intrinsic permeability of unsaturated clayey soil: analytical modelling versus experimental data. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 184.
- UNE 103-101. (1995). *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*.
- UNE 103-103. (1994). *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*.
- UNE 103-104. (1993). *Determinación del límite plástico de un suelo*.
- UNE 103-401. (1998). *Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo*.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379-392.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *In Special report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board, Washington, D.C.*

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

### **CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE SENSORES GEOTÉCNICOS**

Calibración y verificación de piezómetros de cuerda vibrante

Calibración de extensómetro horizontal

Calibración, implementación de un convertidor en el sensor MPS-2

---

## Calibración y verificación del Piezómetro de Cuerda Vibrante Canal-1, Serial 334250.

<b>Modelo:</b>	VWP-3200	<b>Tipo de filtro:</b>	LAE	<b>Presión:</b>	990.2 mbar	<b>Lugar de calibración</b>	Laboratorio de mecánica de suelos UPC.
<b>Serial:</b>	334250	<b>Fecha:</b>	05/11/2018	<b>Frecuencia:</b>	3047.9 Hz	<b>Realizado por:</b>	Angel Mamani M.
<b>ID:</b>	Canal-1	<b>Hora:</b>	16:00	<b>Temperatura:</b>	3718.1 Ohms	<b>Supervisado por:</b>	Marcel Hürlimann Z./José Moya S.

Alt. Agua prevista [cm]	Presión aplicada		Presión barométrica (hPa)				Lectura [dígitos]				Lecturas de Temperatura				Presión calculada (kPa)			Error (kPa)			Error (cm Agua)				
	Alt. real de agua [cm]	Presión real [kPa]	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	media	Lectura 1 [Hz]	Lectura 2 [Hz]	Lectura 3 [Hz]	Promedio [dígitos]	Lectura 1 [ohms]	Lectura 2 [ohms]	Lectura 3 [ohms]	Temp. Promedio [°C]	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC		
0.00	0.00	0.000				990.16				3047.94				9289.95		3718.08		20.12	0.000	-0.357	0.000	0.000	0.357	0.000	0.000
11.00	10.50	1.030	989.60	989.70	989.70	989.67	3044.25	3044.13	3044.01	9266.72	3767.00	3767.80	3768.30	19.83	1.029	0.689	1.045	0.001	0.341	-0.016	0.012	3.477	-0.159		
20.00	19.50	1.912	989.50	989.50	989.50	989.50	3041.63	3041.39	3041.51	9250.75	3780.80	3780.30	3781.10	19.75	1.767	1.438	1.795	0.146	0.474	0.118	1.485	4.835	1.199		
31.00	30.50	2.991	989.60	989.40	989.50	989.50	3037.81	3037.81	3037.81	9228.29	3778.20	3778.10	3777.90	19.76	2.844	2.531	2.888	0.147	0.460	0.103	1.500	4.688	1.052		
40.30	39.80	3.903	989.60	989.40	989.50	989.50	3034.47	3034.59	3034.71	9208.74	3781.00	3782.10	3782.90	19.74	3.778	3.479	3.835	0.125	0.424	0.068	1.277	4.326	0.690		
50.20	49.70	4.874	989.50	989.50	989.40	989.47	3031.25	3031.49	3031.37	9189.22	3796.10	3797.10	3798.20	19.65	4.699	4.413	4.770	0.175	0.461	0.104	1.787	4.699	1.064		
60.00	59.50	5.835	989.50	989.40	989.40	989.43	3028.15	3028.39	3028.15	9170.20	3800.10	3800.90	3801.30	19.63	5.604	5.331	5.688	0.231	0.504	0.147	2.354	5.134	1.499		
70.00	69.50	6.816	989.50	989.40	989.60	989.50	3024.82	3024.70	3024.58	9148.79	3802.50	3803.60	3804.30	19.62	6.635	6.377	6.733	0.181	0.439	0.082	1.843	4.477	0.841		
80.00	79.50	7.796	989.40	989.60	989.50	989.50	3021.00	3021.36	3021.24	9127.65	3808.60	3811.20	3812.30	19.57	7.642	7.397	7.754	0.155	0.399	0.042	1.578	4.069	0.433		
90.00	89.50	8.777	989.60	989.60	989.40	989.53	3017.78	3017.90	3017.90	9107.49	3819.10	3822.40	3826.00	19.51	8.603	8.372	8.729	0.174	0.405	0.048	1.773	4.129	0.494		
101.00	100.50	9.856	989.40	989.40	989.50	989.43	3014.09	3013.97	3013.97	9084.24	3835.20	3837.90	3839.80	19.42	9.696	9.480	9.836	0.160	0.376	0.019	1.630	3.833	0.197		
110.00	109.50	10.738	989.40	989.50	989.40	989.43	3010.75	3010.99	3010.99	9065.57	3850.10	3852.20	3855.00	19.33	10.579	10.375	10.732	0.159	0.363	0.007	1.621	3.703	0.067		
120.00	119.50	11.719	989.40	989.40	989.40	989.40	3007.65	3007.65	3007.53	9045.72	3862.60	3865.20	3867.10	19.26	11.518	11.327	11.683	0.201	0.392	0.036	2.047	4.001	0.365		
130.00	129.50	12.700	989.30	989.50	989.40	989.40	3004.19	3004.19	3003.95	9024.70	3878.40	3882.10	3884.70	19.17	12.514	12.336	12.692	0.185	0.364	0.007	1.891	3.711	0.075		
140.00	139.50	13.680	989.50	989.60	989.60	989.57	3000.62	3000.74	3000.50	9003.70	3889.90	3892.90	3895.60	19.10	13.528	13.363	13.719	0.152	0.318	-0.039	1.551	3.240	-0.396		
149.20	148.70	14.582	989.50	989.60	989.50	989.53	2997.40	2997.52	2997.40	8984.63	3903.60	3905.80	3907.70	19.03	14.430	14.276	14.632	0.153	0.307	-0.050	1.559	3.130	-0.505		
																			Error medio	0.147	0.399	0.042	1.494	4.068	0.432
																			Error máx	0.231	0.504	0.147	2.354	5.134	1.499

1.- Ecuación para calcular la Temperatura [°C]

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3} - 273.2$$

Factor para la Temperatura °C.	
A	1.4051E-03
B	2.369E-04
C	1.019E-07

2.- Ecuación lineal para calcular la presión de agua.

$$L = k(R_i - R_0) + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0)$$

Factor Termal (T)	
kPa por °C	
0.122254005	

Factor Lineal (k)	
kPa por dígitos	
-0.047901366	

3.- Ecuación Polinómica para calcular la presión de agua.

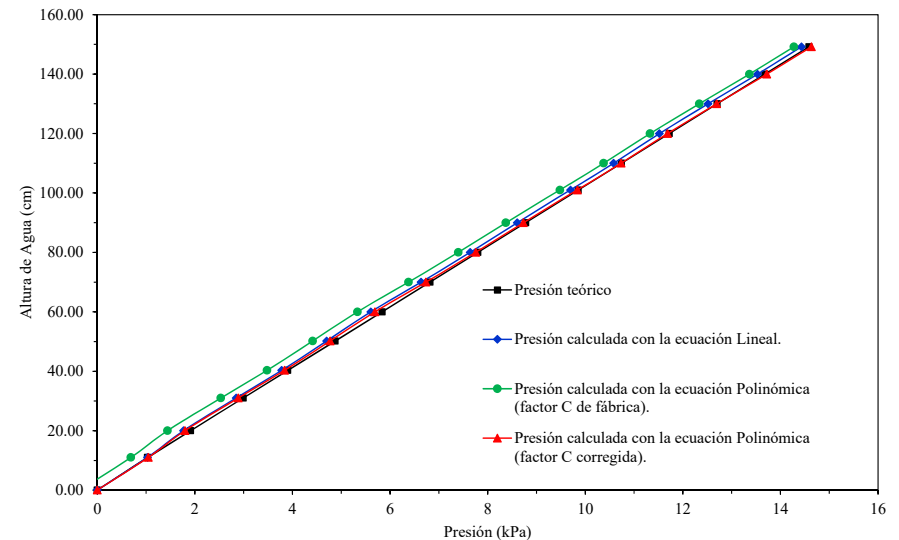
$$P = AR_i^2 + BR_i + C + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0) + D$$

$$C_{cal} = -AR_0^2 - BR_0$$

- L Presión calculada a partir de la ecuación lineal en (kPa).
- k Factor de calibración para ecuación lineal.
- R<sub>0</sub> Lectura Inicial de presión en dígitos.
- R<sub>i</sub> Lectura actual de presión en dígitos.
- K Factor termal.
- T<sub>0</sub> Lectura inicial de temperatura [°C].
- T<sub>i</sub> Lectura actual de temperatura [°C].
- F Factor de conversión de presión atmosférica.
- S<sub>0</sub> Lectura inicial de presión atmosférica.
- S<sub>i</sub> Lectura actual de presión atmosférica.
- A Factor de calibración para la ecuación polinómica.
- B Factor de calibración para la ecuación polinómica.
- C Factor de calibración para la ecuación polinómica. C<sub>cal</sub> es calculado a partir de A y B.
- D Unidad de desfase.

Factor Polinómica	
Factores	kPa
A	-2.00363E-07
B	-0.044902999
C	434.0822399
C <sub>cal</sub>	434.4387719

Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334250



## Calibración y verificación del Piezómetro de Cuerda Vibrante Canal-2, Serial 334251.

<b>Modelo:</b>	VWP-3200	<b>Tipo de filtro:</b>	LAE	<b>Presión:</b>	990.2 mbar	<b>Lugar de calibración</b>	Laboratorio de mecánica de suelos UPC.
<b>Serial:</b>	334251	<b>Fecha:</b>	05/11/2018	<b>Frecuencia:</b>	3026.4 Hz	<b>Realizado por:</b>	Angel Mamani M.
<b>ID:</b>	Canal-2	<b>Hora:</b>	16:00	<b>Temperatura:</b>	3714.7 Ohms	<b>Supervisado por:</b>	Marcel Hürlimann Z./José Moya S.

Alt. Agua prevista [cm]	Presión aplicada		Presión barométrica (hPa)				Lectura [dígitos]				Lecturas de Temperatura				Presión calculada (kPa)			Error (kPa)			Error (cm Agua)			
	Alt. real de agua [cm]	Presión real [kPa]	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	media	Lectura 1 [Hz]	Lectura 2 [Hz]	Lectura 3 [Hz]	Promedio [dígitos]	Lectura 1 [ohms]	Lectura 2 [ohms]	Lectura 3 [ohms]	Temp. Promedio [°C]	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC	Lineal	Polinómica C L <sub>0</sub> de fábrica	Polinómica C L <sub>0</sub> UPC	
0.00	0.00	0.000				990.18				3026.39	9159.01			3714.73	20.14	0.000	0.707	0.000	0.000	-0.707	0.000	0.000	-7.207	0.000
11.00	10.50	1.030	989.60	989.70	989.70	989.67	3023.15	3023.15	3023.03	9139.18	3754.80	3755.40	3756.10	19.90	0.955	1.677	0.971	0.075	-0.648	0.059	0.760	-6.605	0.602	
20.00	19.50	1.912	989.50	989.50	989.50	989.50	3020.52	3020.52	3020.52	9123.57	3774.30	3774.30	3774.60	19.79	1.741	2.475	1.768	0.172	-0.563	0.144	1.749	-5.738	1.469	
31.00	30.50	2.991	989.60	989.40	989.50	989.50	3017.31	3017.07	3017.19	9103.42	3772.70	3772.50	3772.80	19.80	2.795	3.544	2.838	0.196	-0.553	0.154	2.002	-5.642	1.565	
40.30	39.80	3.903	989.60	989.40	989.50	989.50	3014.33	3014.45	3014.33	9086.41	3776.20	3777.10	3778.70	19.77	3.680	4.442	3.735	0.223	-0.539	0.168	2.278	-5.497	1.711	
50.20	49.70	4.874	989.50	989.50	989.40	989.47	3011.58	3011.35	3011.23	9068.45	3791.30	3792.00	3792.50	19.68	4.604	5.379	4.673	0.270	-0.506	0.201	2.755	-5.156	2.052	
60.00	59.50	5.835	989.50	989.40	989.40	989.43	3008.13	3008.37	3008.25	9049.54	3794.20	3795.00	3795.80	19.67	5.587	6.376	5.670	0.248	-0.541	0.165	2.532	-5.521	1.687	
70.00	69.50	6.816	989.50	989.40	989.60	989.50	3005.03	3005.03	3005.03	9030.19	3796.80	3797.90	3798.80	19.65	6.602	7.406	6.699	0.213	-0.590	0.116	2.176	-6.020	1.188	
80.00	79.50	7.796	989.40	989.60	989.50	989.50	3001.81	3001.93	3001.93	9011.33	3802.60	3805.30	3806.60	19.61	7.582	8.400	7.693	0.214	-0.603	0.104	2.182	-6.152	1.055	
90.00	89.50	8.777	989.60	989.60	989.40	989.53	2998.83	2998.95	2998.71	8992.97	3813.90	3816.80	3820.30	19.54	8.537	9.367	8.660	0.240	-0.590	0.117	2.451	-6.015	1.193	
101.00	100.50	9.856	989.40	989.40	989.50	989.43	2995.37	2995.37	2995.37	8972.25	3829.60	3832.00	3834.10	19.45	9.598	10.443	9.736	0.258	-0.587	0.120	2.626	-5.988	1.219	
110.00	109.50	10.738	989.40	989.50	989.40	989.43	2992.39	2992.39	2992.39	8954.40	3844.50	3846.50	3848.80	19.37	10.521	11.378	10.671	0.218	-0.639	0.067	2.219	-6.520	0.687	
120.00	119.50	11.719	989.40	989.40	989.40	989.40	2989.41	2989.17	2989.41	8936.10	3856.60	3859.80	3861.10	19.30	11.465	12.334	11.628	0.254	-0.615	0.091	2.590	-6.276	0.931	
130.00	129.50	12.700	989.30	989.50	989.40	989.40	2985.95	2986.07	2986.19	8916.63	3872.70	3876.30	3879.30	19.20	12.470	13.353	12.646	0.230	-0.653	0.054	2.342	-6.658	0.550	
140.00	139.50	13.680	989.50	989.60	989.60	989.57	2983.09	2982.85	2982.97	8898.13	3883.80	3887.00	3889.70	19.14	13.446	14.341	13.634	0.234	-0.660	0.046	2.391	-6.734	0.474	
149.20	148.70	14.582	989.50	989.60	989.50	989.53	2980.23	2980.23	2980.11	8881.55	3897.30	3900.00	3901.80	19.07	14.300	15.206	14.499	0.282	-0.624	0.083	2.876	-6.359	0.848	
															Error medio		0.208	-0.601	0.106	2.121	-6.130	1.077		
															Error máx		0.282	-0.506	0.201	2.876	-5.156	2.052		

1.- Ecuación para calcular la Temperatura [°C]

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3} - 273.2$$

Factor para la Temperatura °C.

A	1.4051E-03
B	2.369E-04
C	1.019E-07

2.- Ecuación lineal para calcular la presión de agua.

$$L = k(R_i - R_0) + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0)$$

Factor Termal (T)

kPa por °C
0.122254005

Factor Lineal (k)

kPa por dígitos
-0.052245329

3.- Ecuación Polinómica para calcular la presión de agua.

$$P = AR_i^2 + BR_i + C + K(T_i - T_0) - F(S_i - S_0) + D$$

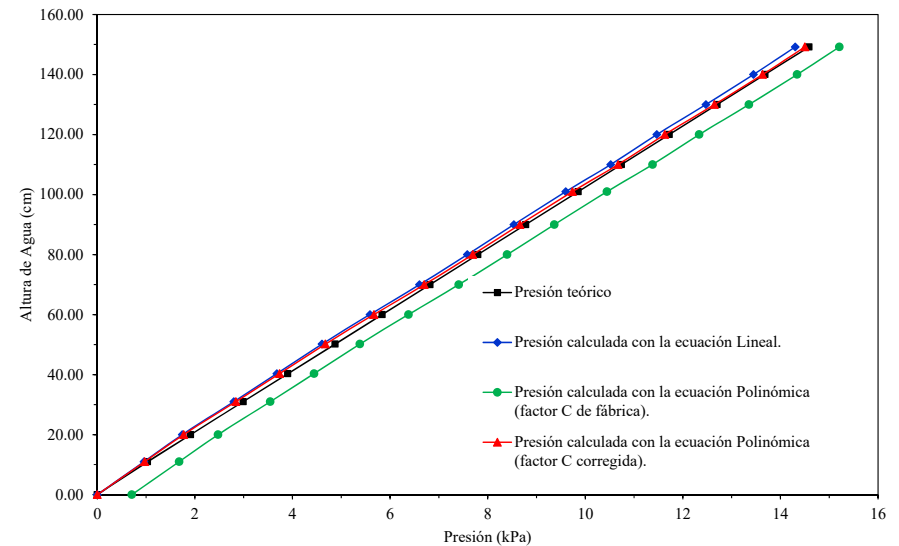
$$C_{cal} = -AR_0^2 - BR_0$$

- L Presión calculada a partir de la ecuación lineal en (kPa).
- k Factor de calibración para ecuación lineal.
- R<sub>0</sub> Lectura Inicial de presión en dígitos.
- R<sub>i</sub> Lectura actual de presión en dígitos.
- K Factor termal.
- T<sub>0</sub> Lectura inicial de temperatura [°C].
- T<sub>i</sub> Lectura actual de temperatura [°C].
- F Factor de conversión de presión atmosférica.
- S<sub>0</sub> Lectura inicial de presión atmosférica.
- S<sub>i</sub> Lectura actual de presión atmosférica.
- A Factor de calibración para la ecuación polinómica.
- B Factor de calibración para la ecuación polinómica.
- C Factor de calibración para la ecuación polinómica. C<sub>cal</sub> es calculado a partir de A y B.
- D Unidad de desfase.

Factor Polinómica

Factores	kPa
A	-2.39166E-07
B	-0.048647444
C	466.3323212
C <sub>cal</sub>	465.6255196

Relación entre columna de agua vs presión de agua en kPa, piezómetro N° serial 334251



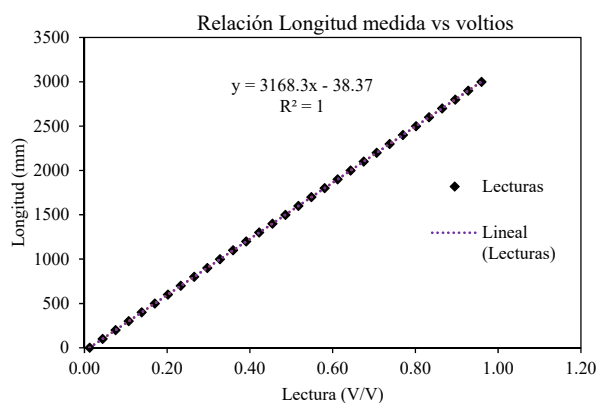
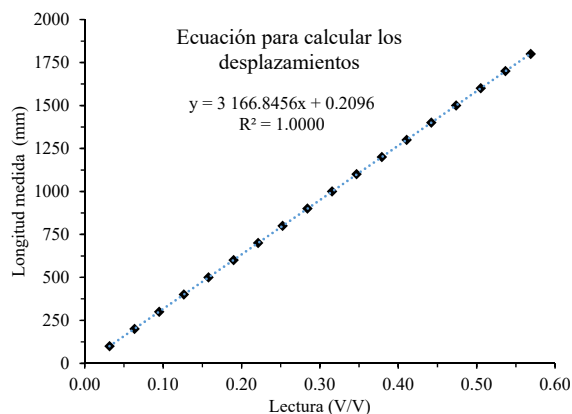
## Calibración de extensómetro ASM WS12-3000

<b>Modelo:</b>	ASM WS12-3000	<b>Fecha:</b>	07/11/2018
<b>Tipo:</b>	WS/POSIWIRE Position Sensors	<b>Lugar de calibración:</b>	Laboratorio de mecánica de suelos UPC.
<b>Rango de medida:</b>	3000 mm	<b>Realizado por:</b>	Angel Mamani M.
<b>Temp. Operacional:</b>	- 20 a 80 °C	<b>Supervisado por:</b>	Marcel Hürlimann Z./José Moya S.

lectura_1 (V/V)	lectura_2 (V/V)	Promedio (V/V)	Medida Extensómetro (mm)	Medida Extensómetro Calculada(mm)
0.01251256	0.01251465	0.01251	0	1.28017
0.04356289	0.04356086	0.04356	100	99.64387
0.07510698	0.07511401	0.07511	200	199.61372
0.10692567	0.10690558	0.10692	300	300.33895
0.13815063	0.13815171	0.13815	400	399.33606
0.17000389	0.16977596	0.16989	500	499.53117
0.20156109	0.20156157	0.20156	600	600.23752
0.23281699	0.23264432	0.23273	700	698.71700
0.26509923	0.26509947	0.26510	800	801.54465
0.296671162	0.29669631	0.29668	900	901.65292
0.32747704	0.32749194	0.32748	1000	999.22271
0.35926139	0.35925382	0.35926	1100	1099.85388
0.39080149	0.39074069	0.39077	1200	1199.61373
0.42228663	0.42228657	0.42229	1300	1299.56054
0.45409447	0.45409572	0.45410	1400	1400.34147
0.48552865	0.48552096	0.48552	1500	1499.90606
0.51710129	0.51708937	0.51710	1600	1599.92425
0.54856032	0.54827672	0.54842	1700	1698.73513
0.58050835	0.58049089	0.58050	1800	1800.79929
0.61191809	0.61179745	0.61186	1900	1899.98786
0.64304167	0.64303112	0.64304	2000	1998.94550
0.67470378	0.6748051	0.67475	2100	2099.61500
0.70617998	0.70617998	0.70618	2200	2199.02003
0.73744231	0.7374422	0.73744	2300	2298.06812
0.769732	0.76973045	0.76973	2400	2400.36698
0.80136359	0.80135524	0.80136	2500	2500.56381
0.8328647	0.8328377	0.83285	2600	2600.30968
0.86439633	0.86436629	0.86438	2700	2700.20172
0.89599258	0.89592713	0.89596	2800	2800.19593
0.92733091	0.92733091	0.92733	2900	2899.69252
0.95958465	0.95957077	0.95958	3000	3001.83807

**Ejemplo con lectura inicial = 0.39 V/V (simulación para instalación en campo)**

lectura (V/V)	cm extenso medido	Incremento lectura (V/V)	incremento cm extenso medido	incremento cm extenso calculado
0.39077109	1200	0	0	
0.4222866	1300	0.03151551	100	100.01
0.454095095	1400	0.063324005	200	200.75
0.485524805	1500	0.094753715	300	300.28
0.517096135	1600	0.126325045	400	400.26
0.54841852	1700	0.15764743	500	499.45
0.58049962	1800	0.18972853	600	601.05
0.61185777	1900	0.22108668	700	700.36
0.643036395	2000	0.252265305	800	799.09
0.67475444	2100	0.28398335	900	899.54
0.70617998	2200	0.31540889	1000	999.06
0.737442255	2300	0.346671165	1100	1098.06
0.769731225	2400	0.378960135	1200	1200.32
0.801359415	2500	0.410588325	1300	1300.48
0.8328512	2600	0.44208011	1400	1400.21
0.86438131	2700	0.47361022	1500	1500.06
0.895959855	2800	0.505188765	1600	1600.06
0.92733091	2900	0.53655982	1700	1699.41
0.95957771	3000	0.56880662	1800	1801.53



Ecuación para calcular los desplazamientos.

$$\Delta P = FR(R_i - R_0) + C$$

Donde:

- $\Delta P$  Desplazamiento en (mm).
- $R_0$  Lectura inicial.
- $R_i$  Lectura actual.
- $FR$  Factor de calibración a partir de la ecuación.
- $C$  Constante

Referencia: A-WS12-3000-R1-L10-M12

Descripción: A-WS12-3000-R1-L10-M12, transductor de cable de rango 3000 mm. Salida R1K. Linealidad 0.1%. Protección IP67.

## Calibración, implementación de un convertidor en el sensor MPS-2

<b>Sensor convertidor:</b>	4015 SDI-12 to Analog converter	<b>Fecha:</b>	24/04/2019
<b>Rango de medida convertidor:</b>	0 - 5 Voltios	<b>Lugar de calibración:</b>	Laboratorio de mecánica de suelos UPC.
<b>Sensor para succión:</b>	MPS-2	<b>Realizado por:</b>	Angel Mamani M.
<b>Rango de medida succión (MPS-2):</b>	- 9 a -100 000 kPa.	<b>Supervisado por:</b>	Marcel Hürlimann Z./José Moya S.

ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador	ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador	ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador
	Tiempo	Voltage [V]			Tiempo	Voltage [V]			Tiempo	Voltage [V]	
1	24/04/2019 14:40:00	0.0265287	1028.20	81	24/04/2019 15:36:00	4.728946	75.90	161	24/04/2019 16:30:00	4.954513	32.00
2	24/04/2019 14:40:30	0.035923	964.00	82	24/04/2019 15:36:30	4.727828	75.90	162	24/04/2019 16:30:30	4.961506	30.80
3	24/04/2019 14:49:00	1.997245	802.00	83	24/04/2019 15:37:00	4.72914	75.80	163	24/04/2019 16:31:00	4.965466	29.60
4	24/04/2019 14:49:30	2.44414	619.40	84	24/04/2019 15:37:30	4.729376	75.50	164	24/04/2019 16:31:30	4.971879	28.60
5	24/04/2019 14:50:00	2.755158	530.80	85	24/04/2019 15:38:00	4.732055	75.70	165	24/04/2019 16:32:00	4.978262	27.40
6	24/04/2019 14:50:30	3.402716	468.40	86	24/04/2019 15:38:30	4.734252	75.20	166	24/04/2019 16:32:30	4.98193	26.30
7	24/04/2019 14:51:00	3.604693	408.80	87	24/04/2019 15:39:00	4.733525	75.40	167	24/04/2019 16:33:00	4.987035	25.50
8	24/04/2019 14:51:30	3.668586	299.30	88	24/04/2019 15:39:30	4.732807	74.90	168	24/04/2019 16:33:30	4.990785	24.60
9	24/04/2019 14:52:00	3.667732	323.20	89	24/04/2019 15:40:00	4.732997	74.80	169	24/04/2019 16:34:00	4.994583	23.90
10	24/04/2019 14:52:30	3.74019	287.00	90	24/04/2019 15:40:30	4.733888	74.80	170	24/04/2019 16:34:30	4.996827	23.20
11	24/04/2019 14:53:00	3.82231	272.30	91	24/04/2019 15:41:00	4.734248	74.70	171	24/04/2019 16:35:00	5.000492	22.60
12	24/04/2019 14:53:30	3.92559	256.00	92	24/04/2019 15:41:30	4.734351	74.60	172	24/04/2019 16:35:30	5.002946	21.90
13	24/04/2019 14:54:00	3.975989	235.40	93	24/04/2019 15:50:00	4.755168	71.90	173	24/04/2019 16:36:00	5.005525	21.30
14	24/04/2019 14:54:30	4.038358	225.60	94	24/04/2019 15:50:30	4.762526	70.60	174	24/04/2019 16:36:30	5.009229	20.80
15	24/04/2019 14:55:00	4.159489	213.40	95	24/04/2019 15:51:00	4.766261	69.10	175	24/04/2019 16:37:00	5.011901	20.30
16	24/04/2019 14:55:30	4.081067	188.80	96	24/04/2019 15:51:30	4.771107	68.20	176	24/04/2019 16:37:30	5.012873	19.80
17	24/04/2019 14:56:00	4.130043	204.30	97	24/04/2019 15:52:00	4.776144	67.30	177	24/04/2019 16:38:00	5.015068	19.50
18	24/04/2019 14:56:30	4.193568	194.60	98	24/04/2019 15:52:30	4.777215	66.40	178	24/04/2019 16:38:30	5.017435	19.00
19	24/04/2019 14:57:00	4.213842	181.90	99	24/04/2019 15:53:00	4.78747	66.20	179	24/04/2019 16:39:00	5.018781	18.60
20	24/04/2019 14:57:30	4.212829	178.10	100	24/04/2019 15:53:30	4.786055	65.50	180	24/04/2019 16:39:30	5.020291	18.30
21	24/04/2019 14:58:00	4.260715	178.10	101	24/04/2019 15:54:00	4.787508	64.50	181	24/04/2019 16:40:00	5.022428	18.00
22	24/04/2019 14:58:30	4.272912	168.60	102	24/04/2019 15:54:30	4.790297	63.90	182	24/04/2019 16:40:30	5.023647	17.60
23	24/04/2019 14:59:00	4.294148	166.20	103	24/04/2019 15:55:00	4.791651	63.40	183	24/04/2019 16:41:00	5.024665	17.30
24	24/04/2019 14:59:30	4.335586	162.00	104	24/04/2019 15:55:30	4.795257	63.10	184	24/04/2019 16:41:30	5.026296	17.00
25	24/04/2019 15:00:00	4.335689	153.80	105	24/04/2019 15:56:00	4.796597	62.40	185	24/04/2019 16:42:00	5.027951	16.70
26	24/04/2019 15:00:30	4.371496	153.80	106	24/04/2019 15:56:30	4.801795	62.10	186	24/04/2019 16:42:30	5.028132	16.40
27	24/04/2019 15:01:00	4.382353	146.80	107	24/04/2019 15:57:00	4.80262	61.40	187	24/04/2019 16:43:00	5.030846	16.20
28	24/04/2019 15:01:30	4.395846	144.50	108	24/04/2019 15:57:30	4.807204	60.90	188	24/04/2019 16:43:30	5.030753	15.90
29	24/04/2019 15:02:00	4.419194	141.90	109	24/04/2019 15:58:00	4.807601	60.10	189	24/04/2019 16:44:00	5.032237	15.70
30	24/04/2019 15:02:30	4.420365	137.20	110	24/04/2019 15:58:30	4.81011	60.10	190	24/04/2019 16:44:30	5.033342	15.50
31	24/04/2019 15:03:00	4.436624	137.00	111	24/04/2019 15:59:00	4.811182	59.60	191	24/04/2019 16:45:00	5.034771	15.30
32	24/04/2019 15:03:30	4.451306	133.80	112	24/04/2019 15:59:30	4.813656	59.30	192	24/04/2019 16:45:30	5.036197	15.10
33	24/04/2019 15:04:00	4.44985	132.50	113	24/04/2019 16:00:00	4.81776	58.80	193	24/04/2019 16:46:00	5.037103	14.90
34	24/04/2019 15:04:30	4.472231	131.20	114	24/04/2019 16:00:30	4.818847	58.10	194	24/04/2019 16:46:30	5.037002	14.70
35	24/04/2019 15:05:00	4.476612	126.50	115	24/04/2019 16:01:00	4.821458	57.90	195	24/04/2019 16:47:00	5.038463	14.50
36	24/04/2019 15:05:30	4.478885	125.90	116	24/04/2019 16:01:30	4.821534	57.40	196	24/04/2019 16:47:30	5.039994	14.30
37	24/04/2019 15:06:00	4.485147	125.30	117	24/04/2019 16:02:00	4.823859	57.30	197	24/04/2019 16:48:00	5.039137	14.20
38	24/04/2019 15:06:30	4.510916	124.30	118	24/04/2019 16:02:30	4.826509	56.80	198	24/04/2019 16:48:30	5.040465	14.10
39	24/04/2019 15:15:00	4.585585	104.80	119	24/04/2019 16:03:00	4.829156	56.30	199	24/04/2019 16:49:00	5.040178	13.90
40	24/04/2019 15:15:30	4.574448	104.30	120	24/04/2019 16:03:30	4.828088	56.10	200	24/04/2019 16:49:30	5.041921	13.80
41	24/04/2019 15:16:00	4.613277	106.50	121	24/04/2019 16:04:00	4.83114	56.00	201	24/04/2019 16:50:00	5.04324	13.60
42	24/04/2019 15:16:30	4.617065	98.60	122	24/04/2019 16:04:30	4.831346	55.50	202	24/04/2019 16:50:30	5.043186	13.50
43	24/04/2019 15:17:00	4.636503	98.00	123	24/04/2019 16:05:00	4.833932	55.30	203	24/04/2019 16:51:00	5.04473	13.40
44	24/04/2019 15:17:30	4.653717	94.00	124	24/04/2019 16:05:30	4.836158	54.90	204	24/04/2019 16:51:30	5.044754	13.20
45	24/04/2019 15:18:00	4.646267	90.70	125	24/04/2019 16:06:00	4.835977	54.50	205	24/04/2019 16:52:00	5.045782	13.10
46	24/04/2019 15:18:30	4.648844	92.10	126	24/04/2019 16:06:30	4.837266	54.50	206	24/04/2019 16:52:30	5.045891	13.00
47	24/04/2019 15:19:00	4.665908	91.70	127	24/04/2019 16:07:00	4.840206	54.10	207	24/04/2019 16:53:00	5.047559	12.90
48	24/04/2019 15:19:30	4.670852	88.20	128	24/04/2019 16:07:30	4.841269	53.70	208	24/04/2019 16:53:30	5.047498	12.70
49	24/04/2019 15:20:00	4.679493	87.30	129	24/04/2019 16:08:00	4.841359	53.50	209	24/04/2019 16:54:00	5.049564	12.60
50	24/04/2019 15:20:30	4.678953	85.90	130	24/04/2019 16:08:30	4.843695	53.40	210	24/04/2019 16:54:30	5.04765	12.50
51	24/04/2019 15:21:00	4.685975	85.50	131	24/04/2019 16:09:00	4.843727	53.10	211	24/04/2019 16:55:00	5.047782	12.40
52	24/04/2019 15:21:30	4.692509	84.10	132	24/04/2019 16:09:30	4.84603	52.90	212	24/04/2019 16:55:30	5.04887	12.30
53	24/04/2019 15:22:00	4.693665	82.90	133	24/04/2019 16:10:00	4.845974	52.60	213	24/04/2019 16:56:00	5.048998	12.20
54	24/04/2019 15:22:30	4.695037	82.70	134	24/04/2019 16:10:30	4.848602	52.40	214	24/04/2019 16:56:30	5.050494	12.10
55	24/04/2019 15:23:00	4.699855	82.50	135	24/04/2019 16:11:00	4.849726	52.00	215	24/04/2019 16:57:00	5.050531	12.00
56	24/04/2019 15:23:30	4.705095	81.50	136	24/04/2019 16:11:30	4.851055	51.80	216	24/04/2019 16:57:30	5.051781	11.90
57	24/04/2019 15:24:00	4.708765	80.50	137	24/04/2019 16:12:00	4.852764	51.50	217	24/04/2019 16:58:00	5.05206	11.80
58	24/04/2019 15:24:30	4.709111	79.60	138	24/04/2019 16:12:30	4.8528	51.40	218	24/04/2019 16:58:30	5.051949	11.70
59	24/04/2019 15:25:00	4.709955	79.70	139	24/04/2019 16:13:00	4.853943	51.20	219	24/04/2019 16:59:00	5.051703	11.60
60	24/04/2019 15:25:30	4.712313	79.40	140	24/04/2019 16:13:30	4.855364	51.00	220	24/04/2019 16:59:30	5.052924	11.60
61	24/04/2019 15:26:00	4.712553	79.10								

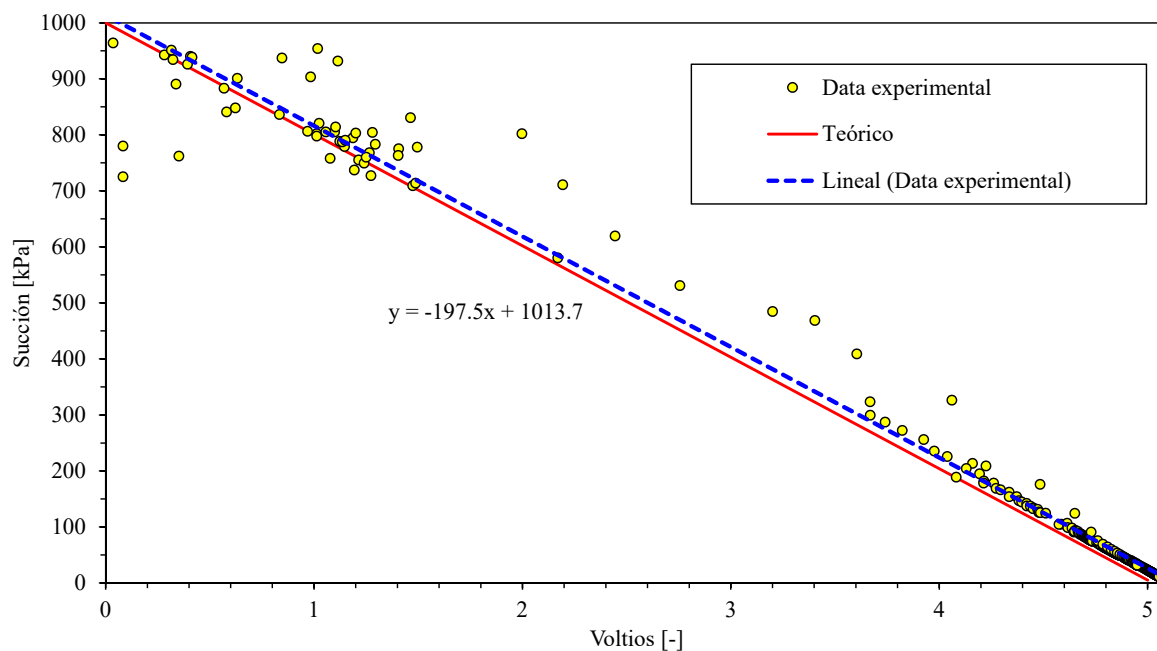


## Calibración, implementación de un convertidor en el sensor MPS-2

<b>Sensor convertidor:</b>	4015 SDI-12 to Analog converter	<b>Fecha:</b>	24/04/2019
<b>Rango de medida convertidor:</b>	0 - 5 Voltios	<b>Lugar de calibración:</b>	Laboratorio de mecánica de suelos UPC.
<b>Sensor para succión:</b>	MPS-2	<b>Realizado por:</b>	Angel Mamani M.
<b>Rango de medida succión (MPS-2):</b>	- 9 a -100 000 kPa.	<b>Supervisado por:</b>	Marcel Hürlimann Z./José Moya S.

ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador	ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador	ID	Registro con Datalogger		Reg. Ordenador
	Tiempo	Voltage [V]			Succión [kPa]	Tiempo			Voltage [V]	Succión [kPa]	
241	25/04/2019 10:31	0.083409	725.2	269	25/04/2019 10:46	1.294041	783.1	296	25/04/2019 10:59	4.840896	56.4
242	25/04/2019 10:32	0.833515	836.3	270	25/04/2019 10:46	1.240357	749.4	297	25/04/2019 11:00	4.854156	53.2
243	25/04/2019 10:33	0.579998	840.9	271	25/04/2019 10:47	1.24995	760.1	298	25/04/2019 11:00	4.866427	50.6
244	25/04/2019 10:33	0.631393	901	272	25/04/2019 10:47	1.077101	758.1	299	25/04/2019 11:01	4.876343	48.2
245	25/04/2019 10:34	0.337183	890.7	273	25/04/2019 10:48	1.012944	802	300	25/04/2019 11:01	4.884521	46.3
246	25/04/2019 10:34	0.406528	939.9	274	25/04/2019 10:48	1.098646	805.2	301	25/04/2019 11:02	4.890399	44.6
247	25/04/2019 10:35	0.392881	926.1	275	25/04/2019 10:49	1.012853	797.8	302	25/04/2019 11:02	4.896964	43.3
248	25/04/2019 10:35	0.413914	938.5	276	25/04/2019 10:49	1.056407	805.2	303	25/04/2019 11:03	4.901666	42.1
249	25/04/2019 10:36	0.322467	934.3	277	25/04/2019 10:50	0.968653	806.3	304	25/04/2019 11:03	4.906203	41
250	25/04/2019 10:36	0.281157	942.7	278	25/04/2019 10:50	1.102953	813.9	305	25/04/2019 11:04	4.912179	40.2
251	25/04/2019 10:37	0.314958	951.1	279	25/04/2019 10:51	1.135824	787.3	306	25/04/2019 11:04	4.91955	38.8
252	25/04/2019 10:37	1.017456	953.9	280	25/04/2019 10:51	1.14964	790.4	307	25/04/2019 11:05	4.925517	37.4
253	25/04/2019 10:38	1.280127	804.2	281	25/04/2019 10:52	1.495345	778	308	25/04/2019 11:05	4.929517	36.2
254	25/04/2019 10:38	0.351033	762	282	25/04/2019 10:52	1.473788	709.2	309	25/04/2019 11:06	4.933335	35.4
255	25/04/2019 10:39	0.845617	937.1	283	25/04/2019 10:53	1.487072	713.6	310	25/04/2019 11:06	4.93831	34.7
256	25/04/2019 10:39	0.622243	847.9	284	25/04/2019 10:53	2.19292	710.9	311	25/04/2019 11:07	4.940318	33.9
257	25/04/2019 10:40	0.567637	883.1	285	25/04/2019 10:54	2.169777	580.3	312	25/04/2019 11:07	4.94167	33.4
258	25/04/2019 10:40	0.983431	903.5	286	25/04/2019 10:54	3.2001	484.6	313	25/04/2019 11:08	4.94408	33.1
259	25/04/2019 10:41	1.024405	820.5	287	25/04/2019 10:55	4.060953	326.3	314	25/04/2019 11:08	4.94555	32.6
260	25/04/2019 10:41	1.199794	803.1	288	25/04/2019 10:55	4.224059	208.8	315	25/04/2019 11:09	4.946763	32.4
261	25/04/2019 10:42	1.265128	768	289	25/04/2019 10:56	4.483877	175.9	316	25/04/2019 11:09	4.946598	32.2
262	25/04/2019 10:42	1.214154	755.2	290	25/04/2019 10:56	4.650335	124.1	317	25/04/2019 11:10	4.946889	32.1
263	25/04/2019 10:43	1.405797	775	291	25/04/2019 10:57	4.7288	90.8	318	25/04/2019 11:10	4.948086	32
264	25/04/2019 10:43	1.273261	727	292	25/04/2019 10:57	4.760208	75.4	319	25/04/2019 11:11	4.948087	31.9
265	25/04/2019 10:44	1.403304	763	293	25/04/2019 10:58	4.785207	69	320	25/04/2019 11:11	4.949221	31.8
266	25/04/2019 10:44	1.193063	737.1	294	25/04/2019 10:58	4.807131	64.2	321	25/04/2019 11:12	4.949175	31.7
267	25/04/2019 10:45	1.146313	779	295	25/04/2019 10:59	4.825	59.8	322	25/04/2019 11:12	4.949435	31.7
268	25/04/2019 10:45	1.123611	788.3								

Relación entre succión vs voltios



Ecuación obtenida para determinar el valor de succión, para datos provenientes de campo en unidades de voltios.

$$\text{Succión [kPa]} = -197.5 * \text{Voltaje} + 1013.7$$

## **ANEXO 2**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO**

Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Determinación de límite líquido y plástico de un suelo

Ensayo de permeabilidad por carga variable, usando el permeámetro

Ensayo de corte Directo – Consolidado - Drenado

---

## ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

**Equipos y materiales.** -son los siguientes: balanza con precisión 0.01g; horno de secado con temperatura regulable; bandejas; mazo de goma; cepillo de acero; brocha para limpiar los tamices y serie de tamices: 100; 80; 63; 50; 40; 25; 20; 12.5; 10; 6.3; 5; 2; 1.25; 0.40; 0.160 y 0.080.

**Preparación de la muestra.** - consistió en colocar la muestra de suelo en una bandeja, luego se controló el peso en una balanza; en seguida, se dejó secar en horno por 24 horas. Después de retirar la muestra del horno, con la ayuda del mazo de goma se desmenuzó los terrones del suelo.

**Procedimiento del tamizado para ensayo granulométrico.** -Primero se tamizó en el tamiz N° 10 para separar el material en dos grupos: retenido y el que pasa. En seguida, se controló el peso de cada uno. Luego, se colocó en bandejas diferentes y se añadió agua para remojar por 24 horas.

El material retenido ( $> 2\text{mm}$ ), se colocó encima de la columna de tamices N° 40 y 200 (abertura 0.425 a 0.074 mm). Luego, se lavó con agua el material fino que se encuentra en el tamiz N° 200, hasta que el agua salga limpia. Luego se secó en el horno y se controló su peso. Mientras el material que pasa por el tamiz N°10 ( $\leq 2\text{mm}$ ); se colocó directamente en el tamiz N° 200 (abertura 0.074 mm) y se lavó hasta que salga agua limpia. Después, se colocó en una bandeja para secar en el horno y controlar su peso.



**Figura:** (a) Serie de tamices abertura 40 a 0.074 mm. (b) Muestra de suelo M-1 representa al estrato coluvial. (c) Muestra de suelo M-2 representa a la capa de argilita alterada. (d) Muestra de suelo M-3 representa a la capa de argilita inalterada. (e) Balanza electrónica con precisión 0.01 gramos.

Finalmente, se armó una columna de tamices con abertura en mm (40; 25; 12.5; 10; 6.3; 5; 2; 1.25; 0.40; 0.160 y 0.080) ver la Figura. En seguida, se colocó el material lavado y seco en la parte superior. Luego, se procedió el tamizado con la ayuda de un equipo tamizador por vibración por un tiempo de 2 minutos. Después, se controló el peso del material retenido en cada tamiz con la ayuda de una balanza de precisión 0.01.

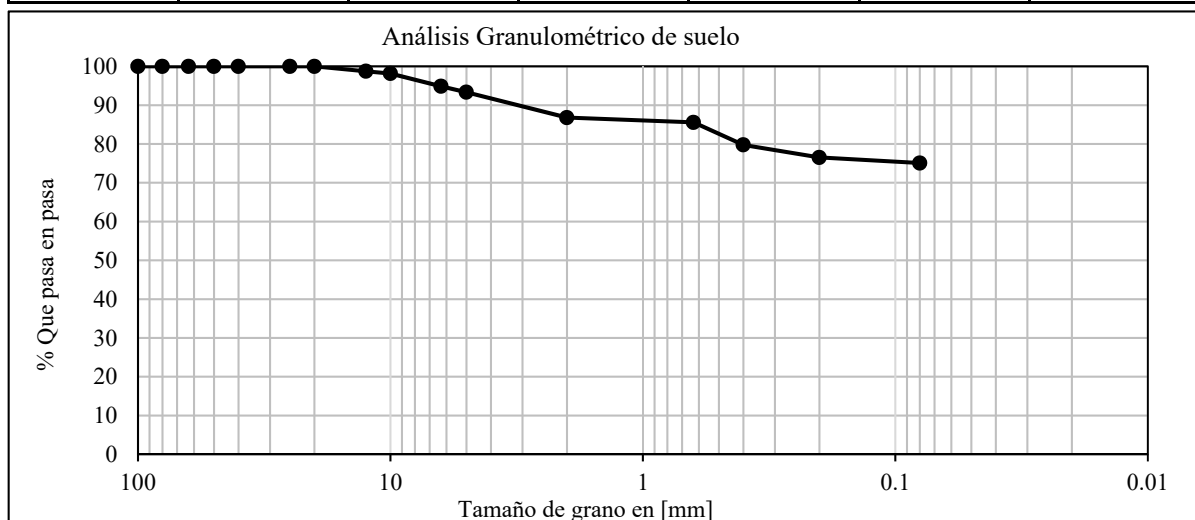
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

### UNE 103-101-1995

<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Laboratorio:</b>	GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.	<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019
<b>Sondaje:</b>	PZ-2	<b>Prof. (cm)</b>	15-40
		<b>Muestra de identificación:</b>	M-3

<b>Muestra</b>	M-3	<b>Peso de agua:</b>	34.99
<b>N° de Tara</b>	M-87	<b>Peso seco total:</b>	309.86
<b>T+S+A</b>	516.31	<b>Humedad %:</b>	11.29
<b>T+S</b>	481.32	<b>&gt; 0.08</b>	248.85
<b>T</b>	171.46		

Tamiz ASTM		Tamiz UNE mm	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
Desig.	mm					
4"	101.6	100	0	0.00	0.00	100.00
3"	76.2	80	0	0.00	0.00	100.00
2,5"	63.5	63	0	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	50	0	0.00	0.00	100.00
1,5"	38.1	40	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	25	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.1	20	0	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.7	12.5	3.88	1.25	1.25	98.75
3/8"	9.52	10	1.8	0.58	1.83	98.17
1/4"	6.35	6.3	10.26	3.31	5.14	94.86
N°4	4.75	5	4.7	1.52	6.66	93.34
N°10	2	2	20.3	6.55	13.21	86.79
N°30	0.59	0.63	3.79	1.22	14.44	85.56
N°40	0.72	0.4	17.95	5.79	20.23	79.77
N°70	0.21	0.2	10.05	3.24	23.47	76.53
N°200	0.074	0.08	4.34	1.40	24.87	75.08
		Fondo	0.15	0.05	24.92	



Porcentaje de Grava:	5.14	Clasificación (SUCS):	CL
Porcentaje de Arena:	19.78		
Porcentaje de Limo:	75.08	Comentario:	Coluvial

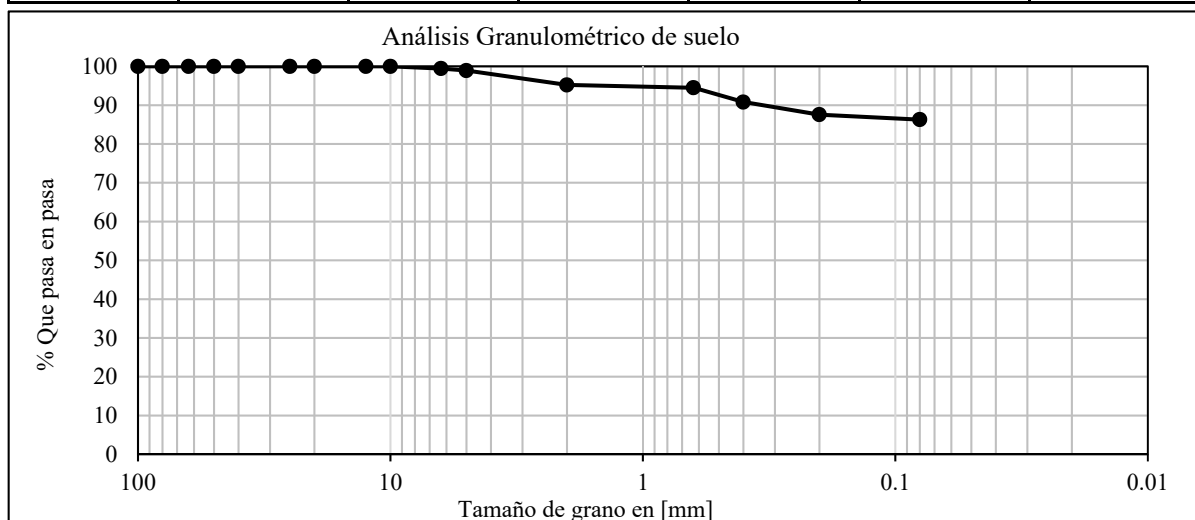
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

### UNE 103-101-1995

<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Laboratorio:</b>	GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.	<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019
<b>Sondaje:</b>	PZ-3	<b>Prof. (cm)</b>	40-78
		<b>Muestra de identificación:</b>	M-2

<b>Muestra</b>	M-2	<b>Peso de agua:</b>	24.59
<b>N° de Tara</b>	M-79	<b>Peso seco total:</b>	143.65
<b>T+S+A</b>	317.15	<b>Humedad %:</b>	17.12
<b>T+S</b>	292.56	<b>&gt; 0.08</b>	168.6
<b>T</b>	148.91		

Tamiz ASTM		Tamiz UNE mm	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
Desig.	mm					
4"	101.6	100	0	0.00	0.00	100.00
3"	76.2	80	0	0.00	0.00	100.00
2,5"	63.5	63	0	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	50	0	0.00	0.00	100.00
1,5"	38.1	40	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	25	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.1	20	0	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.7	12.5	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	10	0	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.35	6.3	0.81	0.56	0.56	99.44
N°4	4.75	5	0.74	0.52	1.08	98.92
N°10	2	2	5.34	3.72	4.80	95.20
N°30	0.59	0.63	1.03	0.72	5.51	94.49
N°40	0.72	0.4	5.3	3.69	9.20	90.80
N°70	0.21	0.2	4.64	3.23	12.43	87.57
N°200	0.074	0.08	1.76	1.23	13.66	86.29
		Fondo	0.08	0.06	13.71	



Porcentaje de Grava:	0.56	Clasificación (SUCS):	CL
Porcentaje de Arena:	13.15		
Porcentaje de Limo:	86.29	Comentario:	Argilita Alterada.

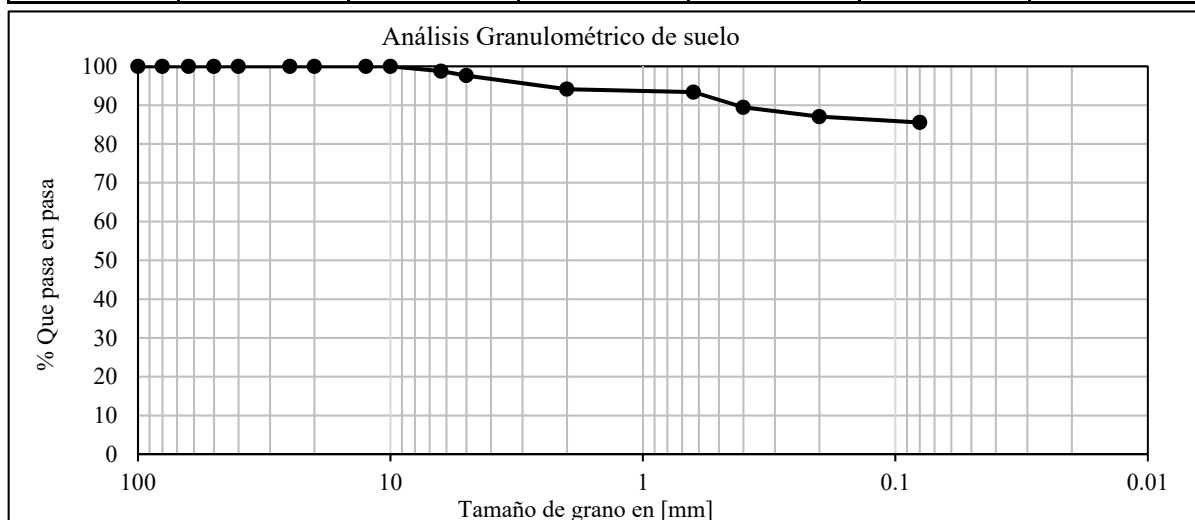
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

### UNE 103-101-1995

<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Laboratorio:</b>	GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.	<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019
<b>Sondaje:</b>	PZ-2	<b>Prof. (cm)</b>	85-103
		<b>Muestra de identificación:</b>	M-1

<b>Muestra</b>	M-1	<b>Peso de agua:</b>	14.27
<b>Nº de Tara</b>	M-122	<b>Peso seco total:</b>	106.55
<b>T+S+A</b>	271.24	<b>Humedad %:</b>	13.39
<b>T+S</b>	256.97	<b>&gt; 0.08</b>	165.36
<b>T</b>	150.42		

Tamiz ASTM		Tamiz UNE mm	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
Desig.	mm					
4"	101.6	100	0	0.00	0.00	100.00
3"	76.2	80	0	0.00	0.00	100.00
2,5"	63.5	63	0	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	50	0	0.00	0.00	100.00
1,5"	38.1	40	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	25	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.1	20	0	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.7	12.5	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	10	0	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.35	6.3	1.32	1.24	1.24	98.76
Nº4	4.75	5	1.21	1.14	2.37	97.63
Nº10	2	2	3.74	3.51	5.88	94.12
Nº30	0.59	0.63	0.81	0.76	6.64	93.36
Nº40	0.72	0.4	4.18	3.92	10.57	89.43
Nº70	0.21	0.2	2.54	2.38	12.95	87.05
Nº200	0.074	0.08	1.52	1.43	14.38	85.54
		Fondo	0.09	0.08	14.46	

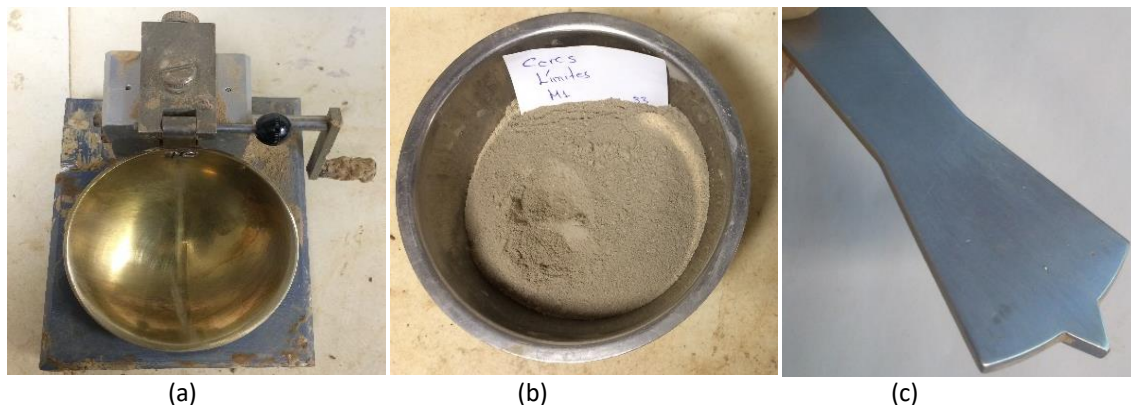


Porcentaje de Grava:	1.24	Clasificación (SUCS):	CH
Porcentaje de Arena:	13.22		
Porcentaje de Limo:	85.54	Comentario:	Argilita Inalterada.

## ENSAYO DE LÍMITE DE ATTERBERG

### Equipos y procedimiento del ensayo para determinar el límite líquido

**Equipos y materiales.** - Son los siguientes: muestra de suelo fino, cuchara de Casagrande, acanalador normalizado para hacer el surco en la cuchara de Casagrande, espátulas, objeto cuadra de vidrio 30x30x0.5 cm para amasar la muestra, horno para secar la muestra y agua destilada.



**Figura:** (a) Cuchara de Casagrande (b) muestras de suelo que ha pasado el tamiz Nro. 40 (0.425 mm); (c) acanalador normalizado para hacer el surco. (Laboratorio de mecánica de suelos GEOMAR).

**Procedimiento.** -Primero se secó las muestras en el horno, después se desmenuzó los terrones con el mazo de goma y luego se tamizó por el tamiz N°40 (0.425mm). Con el material que ha pasado por el tamiz se tomó unos 200 gramos de suelo. Sobre la lámina cuadra de vidrio se preparó la mezcla homogénea de material fino con agua destilada, hasta formar una masa tipo plastilina.

En seguida, la masa homogénea de suelo se colocó sobre la cuchara de Casagrande, enrasando 10mm de altura y evitando que se produzca burbujas de aire; y luego con el acanalador se realizó un surco tocando el fondo de cuchara de Casagrande. A continuación, se inició de forma inmediata girar la manivela con una velocidad de dos vueltas por segundo; y se contó el número de golpes hasta que se cierre la pared del surco en el fondo de 13mm de longitud.

Finalmente, de forma general si el número de golpe se encuentra en rango de (25-35), se toma una porción de muestra cerca al surco donde se cerró, para obtener su contenido de humedad. En seguida, hacer nuevamente el ensayo aumentando el contenido de humedad, para conseguir el número de golpes en rango de (15-25) y también se toma muestra para controlar la humedad. Si el número de golpes no cae en los rangos mencionados repetir el ensayo hasta conseguir.

### Equipos y procedimiento del ensayo para determinar el límite plástico

Los equipo y materiales que se han empleado en el ensayo son: muestra de suelo fino 20 gramos; espátulas, una superficie de cristal 30x30x2.5cm, agua destilada y el horno para el secado.

El proceso para obtener el LP; primero se tamizó el suelo en tamiz N° 40 (0.425). El material que ha pasado por el tamiz, se tomó unos 20 gr y se mezcló con agua hasta formar una masa plástica. Luego se tomó la mitad de masa plástica de suelo para formar unos elipsoides y se hizo rodar entre los dedos sobre una superficie lisa hasta que presente fisura los cilindros formados de 3 mm de diámetro; finalmente, se colocó los cilindros de suelo en una tara para pesar y posteriormente secar la muestra y obtener la humedad.



**DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN SUELO**  
**UNE 103-103-1994 / 103-104-1994**

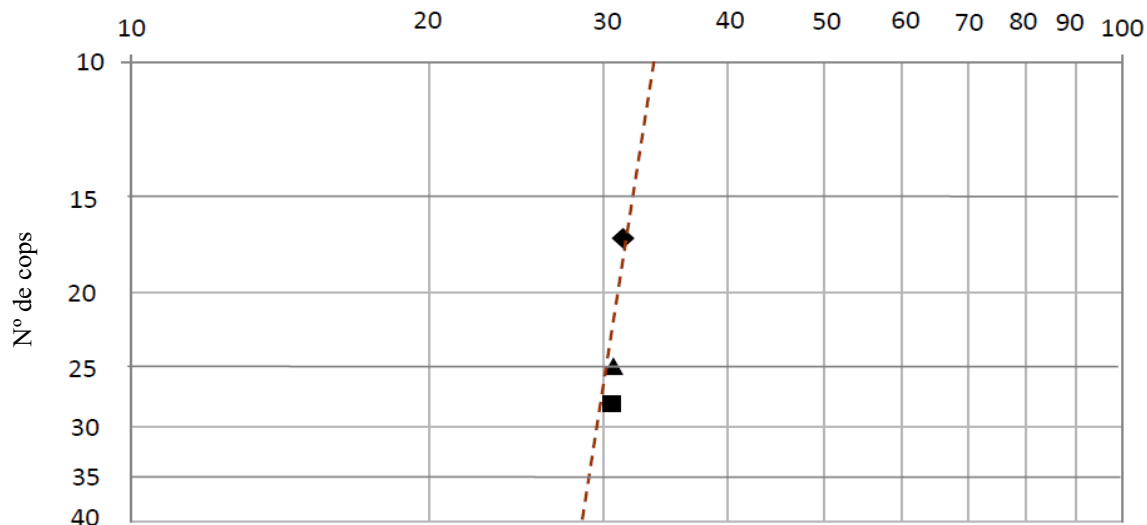
<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Sondaje:</b>	PZ-2	<b>Prof. (cm)</b>	15
<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019		
<b>Capa:</b>	Coluvial.	<b>Muestra:</b>	M-3
<b>Ejecución del ensayo en:</b>	Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.		

**LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO**

Descripción	Límite Líquido		Límite Plástico	
	# 1	# 2	# 1	# 2
Referencia	# 1	# 2	# 1	# 2
Nº de Cops	17	28	-	-
Tara número	p52	p60	a91	a53
Tara+Suelo+Agua (g) [T+S+A]	113.1	112.5	57.6	49.0
Tara+Suelo (g) [T+S]	110.1	109.5	57.2	48.6
Tara (g) [T]	100.5	99.9	54.9	46.0
Suelo (g) [S]	9.6	9.6	2.3	2.6
Agua (g) [A]	3.0	2.9	0.4	0.4
% de contenido de humedad	31.4	30.6	15.8	15.7

**GRÁFICO DE LÍMITE LÍQUIDO**

% de Humedad



LÍMITE LÍQUIDO	30.7
----------------	------

LÍMITE PLÁSTICO	15.7
-----------------	------

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	15.0
-----------------------	------

COMENTARIOS

**DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN SUELO**  
**UNE 103-103-1994 / 103-104-1994**

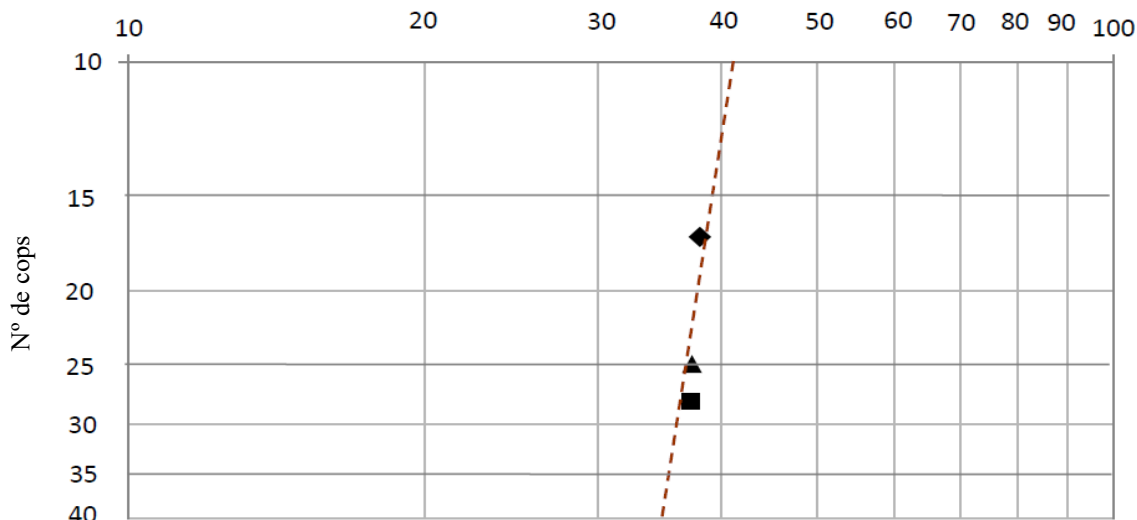
<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Sondaje:</b>	PZ-3	<b>Prof. (cm)</b>	15
<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019		
<b>Capa:</b>	Argilita alterada.	<b>Muestra:</b>	M-2
<b>Ejecución del ensayo en:</b>	Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.		

**LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO**

Descripción	Límite Líquido		Límite Plástico	
	# 1	# 2	# 1	# 2
Referencia	# 1	# 2	# 1	# 2
Nº de Cops	17	28	-	-
Tara número	p82	p25	b35	a64
Tara+Suelo+Agua (g) [T+S+A]	118.8	126.2	56.1	50.7
Tara+Suelo (g) [T+S]	115.2	123.0	55.6	50.2
Tara (g) [T]	105.9	114.3	53.4	47.7
Suelo (g) [S]	9.3	8.6	2.2	2.5
Agua (g) [A]	9.5	3.2	0.4	0.5
% de contenido de humedad	38.1	37.3	19.8	19.8

**GRÁFICO DE LÍMITE LÍQUIDO**

% de Humedad



LÍMITE LÍQUIDO	37.4
----------------	------

LÍMITE PLÁSTICO	19.8
-----------------	------

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	17.6
-----------------------	------

COMENTARIOS

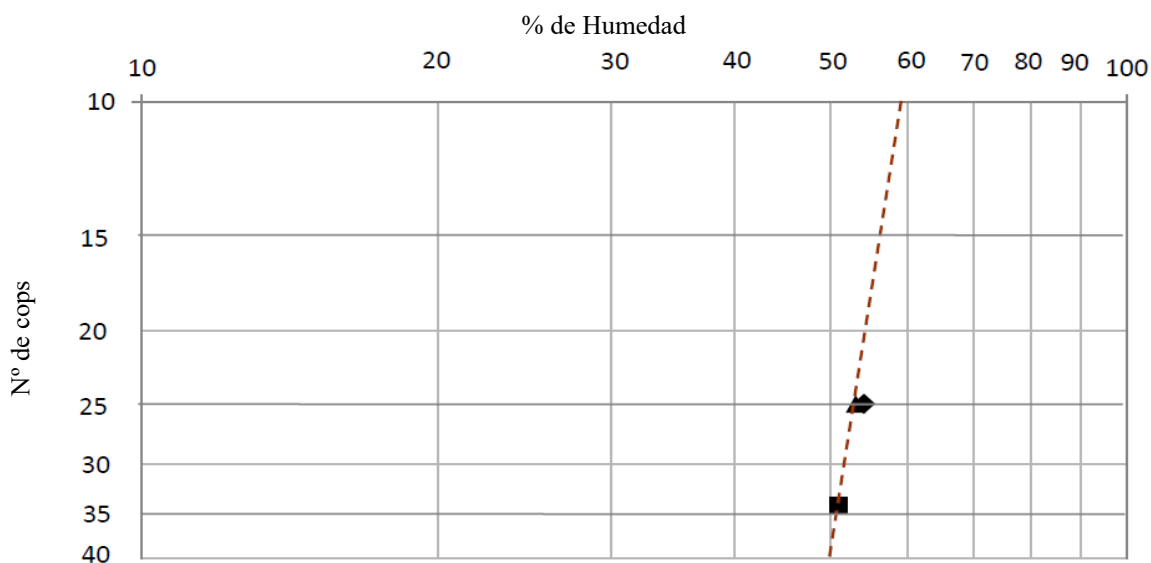
**DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN SUELO**  
**UNE 103-103-1994 / 103-104-1994**

<b>Ubicación:</b>	Ladera Cercs (Deslizamiento existente)	<b>Fecha de muestreo:</b>	17/11/2018
<b>Sondaje:</b>	PZ-2	<b>Prof. (cm)</b>	85
<b>Fecha de ensayo:</b>	28/02/2019		
<b>Capa:</b>	Argilita inalterada.	<b>Muestra:</b>	M-1
<b>Ejecución del ensayo en:</b>	Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.		

**LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO**

Descripción	Límite Líquido		Límite Plástico	
	# 1	# 2	# 1	# 2
Referencia	# 1	# 2	# 1	# 2
Nº de Cops	25	34	-	-
Tara número	p24	p75	a71	a89
Tara+Suelo+Agua (g) [T+S+A]	117.1	116.9	49.5	54.8
Tara+Suelo (g) [T+S]	113.2	113.3	49.0	54.3
Tara (g) [T]	106.1	106.3	46.8	52.1
Suelo (g) [S]	7.2	7.0	2.1	2.2
Agua (g) [A]	3.9	3.6	0.5	0.5
% de contenido de humedad	54.1	51.0	23.8	23.9

**GRÁFICO DE LÍMITE LÍQUIDO**



LÍMITE LÍQUIDO	53.1
----------------	------

LÍMITE PLÁSTICO	23.9
-----------------	------

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29.3
-----------------------	------

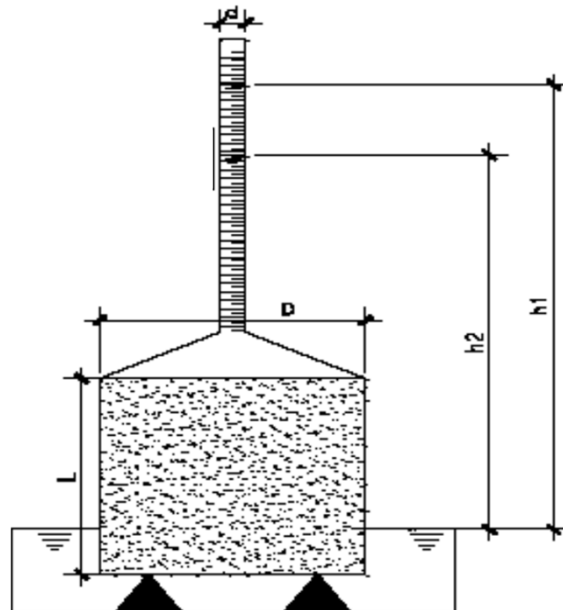
COMENTARIOS

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD POR CARGA VARIABLE**  
**PERMEÁMETRO**

**Ubicación:** Ladera Cercs (Deslizamiento existente)      **Fecha de muestreo:** 17/11/2018  
**Sondaje:** PZ-2      **Profundidad (cm):** 31-35  
**Capa:** Coluvial.      **Muestra:** M-3  
**Ejecución del ensayo en:** Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.

Dimensiones de la bureta.	
Diámetro (cm)	0.70
Sección (cm <sup>2</sup> )	0.38

Dimensiones de la probeta	
Diámetro (cm)	5.04
Altura (cm)	2.48
Sección (cm <sup>2</sup> )	19.95
Volumen (cm <sup>3</sup> )	49.48



Ensayo de permeabilidad	
Tiempo inicial (hs)	10:04:00
Tiempo final (hs)	16:28:00
Intervalo de tiempo (seg)	21840.00
Carga inicial (cm)	31.71
Carga final (cm)	28.501

$$K = \frac{a * L}{A(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

<b>Permeabilidad (cm/seg)</b>	<b>3.34E-07</b>
-------------------------------	-----------------

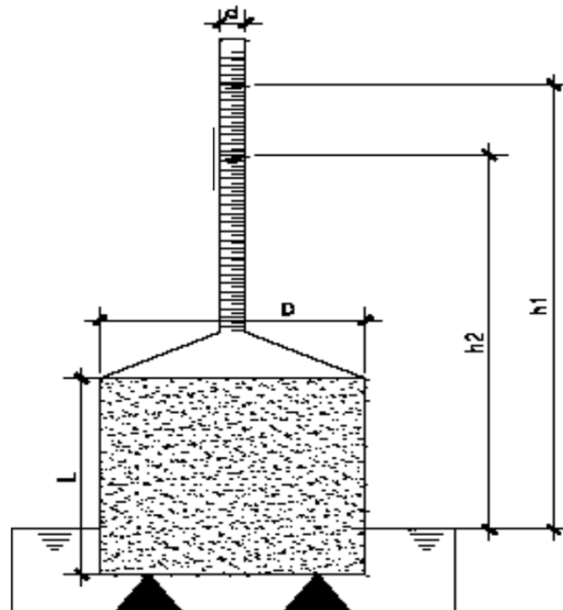
Observaciones

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD POR CARGA VARIABLE**  
**PERMEÁMETRO**

**Ubicación:** Ladera Cercs (Deslizamiento existente)      **Fecha de muestreo:** 17/11/2018  
**Sondaje:** PZ-2      **Profundidad (cm):** 55-59  
**Capa:** Argilita alterada      **Muestra:** M-2  
**Ejecución del ensayo en:** Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.

Dimensiones de la bureta.	
Diámetro (cm)	0.70
Sección (cm <sup>2</sup> )	0.38

Dimensiones de la probeta	
Diámetro (cm)	5.04
Altura (cm)	2.48
Sección (cm <sup>2</sup> )	19.95
Volumen (cm <sup>3</sup> )	49.48



Ensayo de permeabilidad	
Tiempo inicial (hs)	8:24:00
Tiempo final (hs)	14:48:00
Intervalo de tiempo (seg)	23040.00
Carga inicial (cm)	32.45
Carga final (cm)	31.71

$$K = \frac{a * L}{A(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

<b>Permeabilidad (cm/seg)</b>	<b>4.80E-08</b>
-------------------------------	-----------------

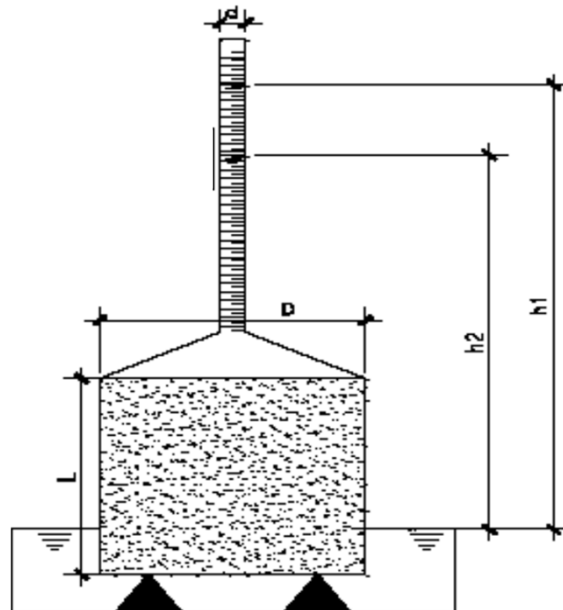
Observaciones

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD POR CARGA VARIABLE**  
**PERMEÁMETRO**

**Ubicación:** Ladera Cercs (Deslizamiento existente)      **Fecha de muestreo:** 17/11/2018  
**Sondaje:** PZ-3      **Profundidad (cm):** 90-94  
**Capa:** Argilita inalterada      **Muestra:** M-1  
**Ejecución del ensayo en:** Laboratorio de GEOMAR Ingeniería del Terreno, SLP.

Dimensiones de la bureta.	
Diámetro (cm)	0.70
Sección (cm <sup>2</sup> )	0.38

Dimensiones de la probeta	
Diámetro (cm)	5.04
Altura (cm)	2.48
Sección (cm <sup>2</sup> )	19.95
Volumen (cm <sup>3</sup> )	49.48



Ensayo de permeabilidad	
Tiempo inicial (hs)	10:51:00
Tiempo final (hs)	15:20:00
Intervalo de tiempo (seg)	16140.00
Carga inicial (cm)	32.45
Carga final (cm)	31.47

$$K = \frac{a * L}{A(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

<b>Permeabilidad (cm/seg)</b>	<b>9.16E-08</b>
-------------------------------	-----------------

Observaciones

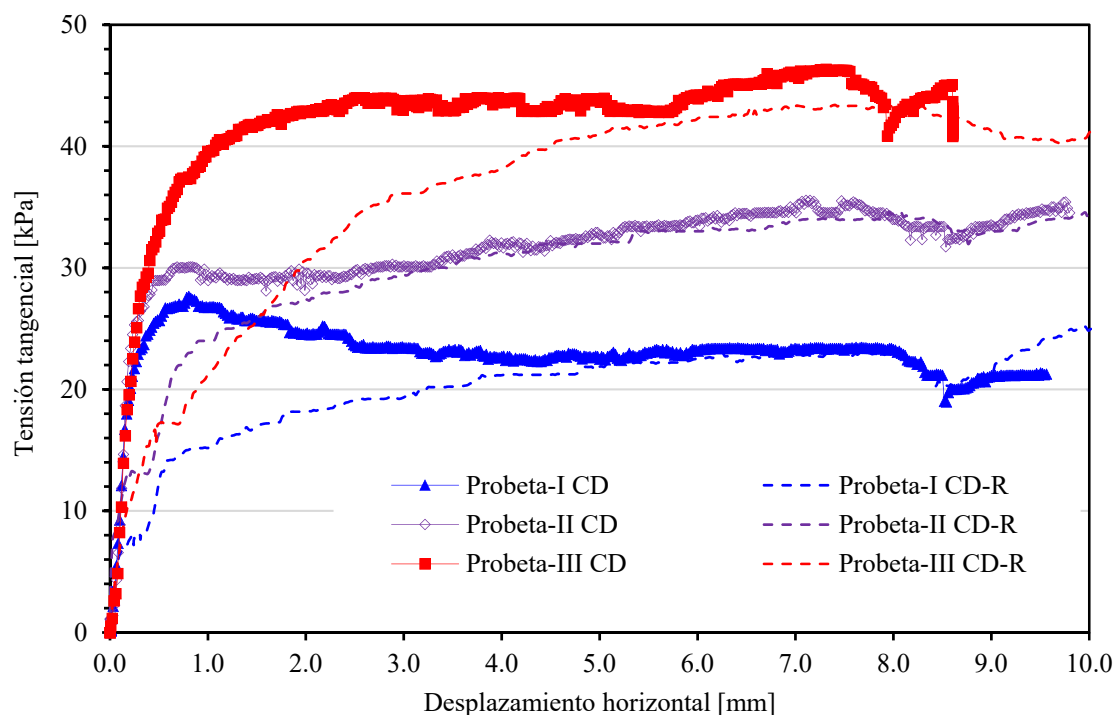
## ENSAYO DE CORTE DIRECTO

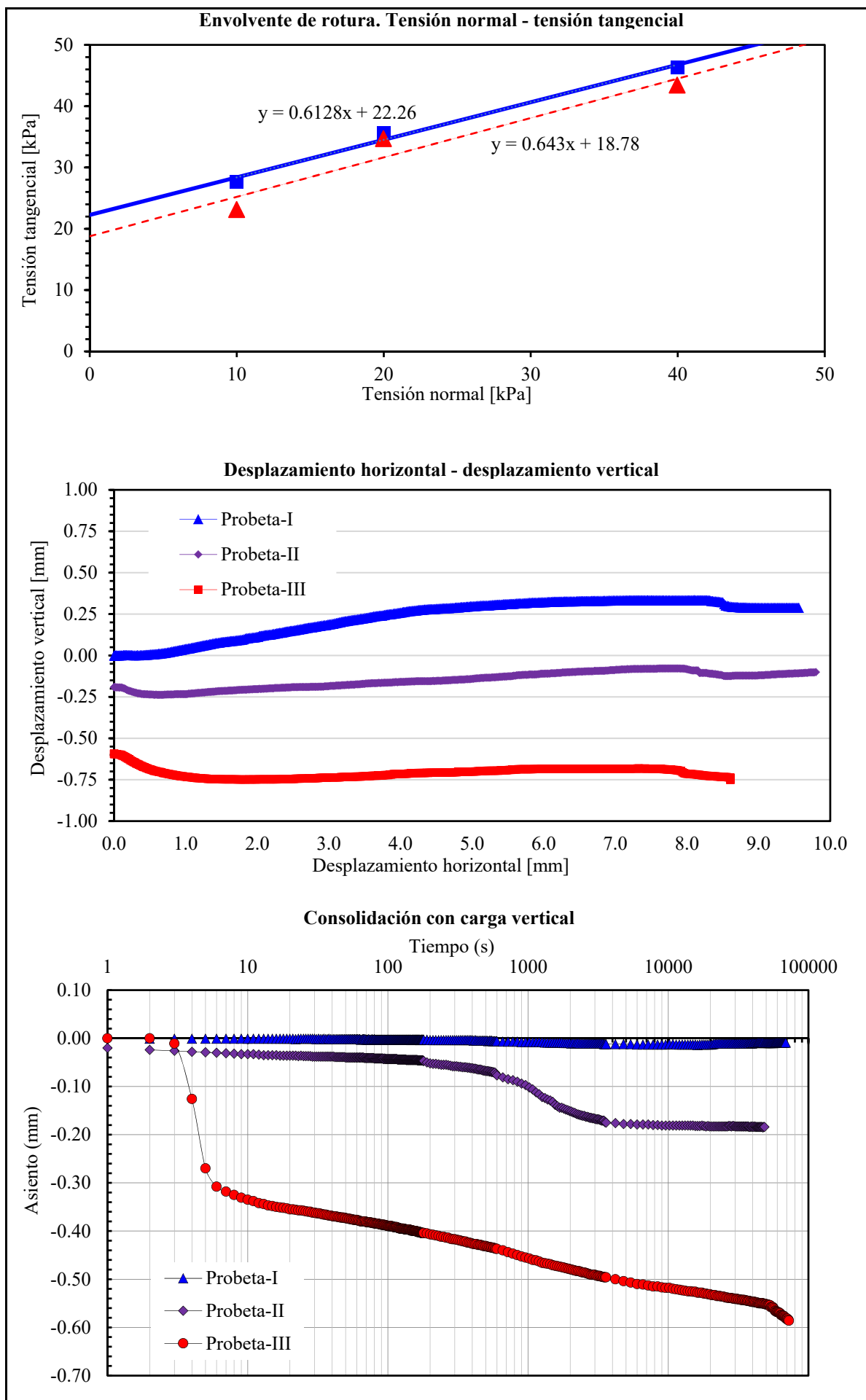
Norma UNE: 103 401: 1998

**Ubicación:** Deslizamiento Superficial Pre-Pirineo (Poblado de Cercs).  
**Sondeo:** PZ-3 **Muestra:** M-3  
**Estrato:** Coluvial **Profundidad:** 23 - 35 cm  
**Fecha:** 16/11/2018 **Ensayo:** Lab. GEOMAR

Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo			
Descripción	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte [mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en platodel equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de probeta de suelo inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	18.43	18.27	21.27
Contenido de humedad final [%]	22.25	22.42	22.31
Densidad húmeda inicial [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.02	2.02	2.02
Densidad húmeda final [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.71	1.71	1.67
Índice de poros inicial	0.582	0.582	0.621
Índice de poros final	0.581	0.57	0.583
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión tangencial máxima [kPa]	27.65	35.60	46.38
Tensión tangencial residual [kPa]	23.14	34.72	43.44
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]	22.26		
Cohesión residual [kPa]	18.78		
Ángulo de fricción interna pico [°]	32		
Ángulo de fricción interna residual [°]	32		

**Curva de desplazamiento vs resistencia residual**







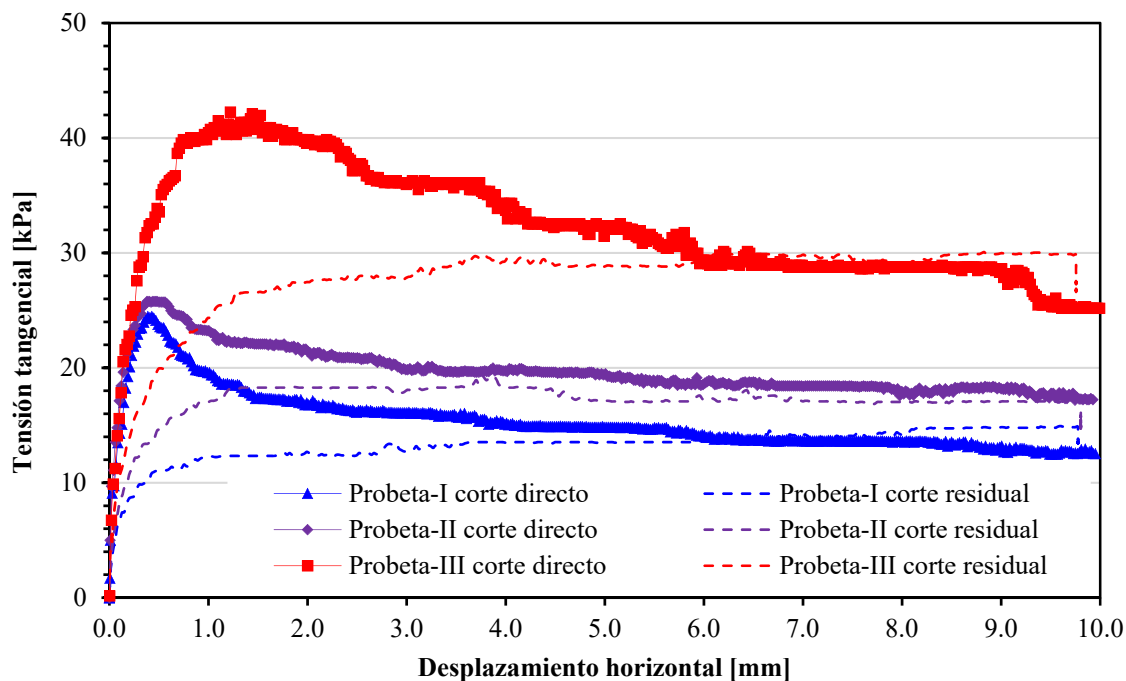
## ENSAYO DE CORTE DIRECTO

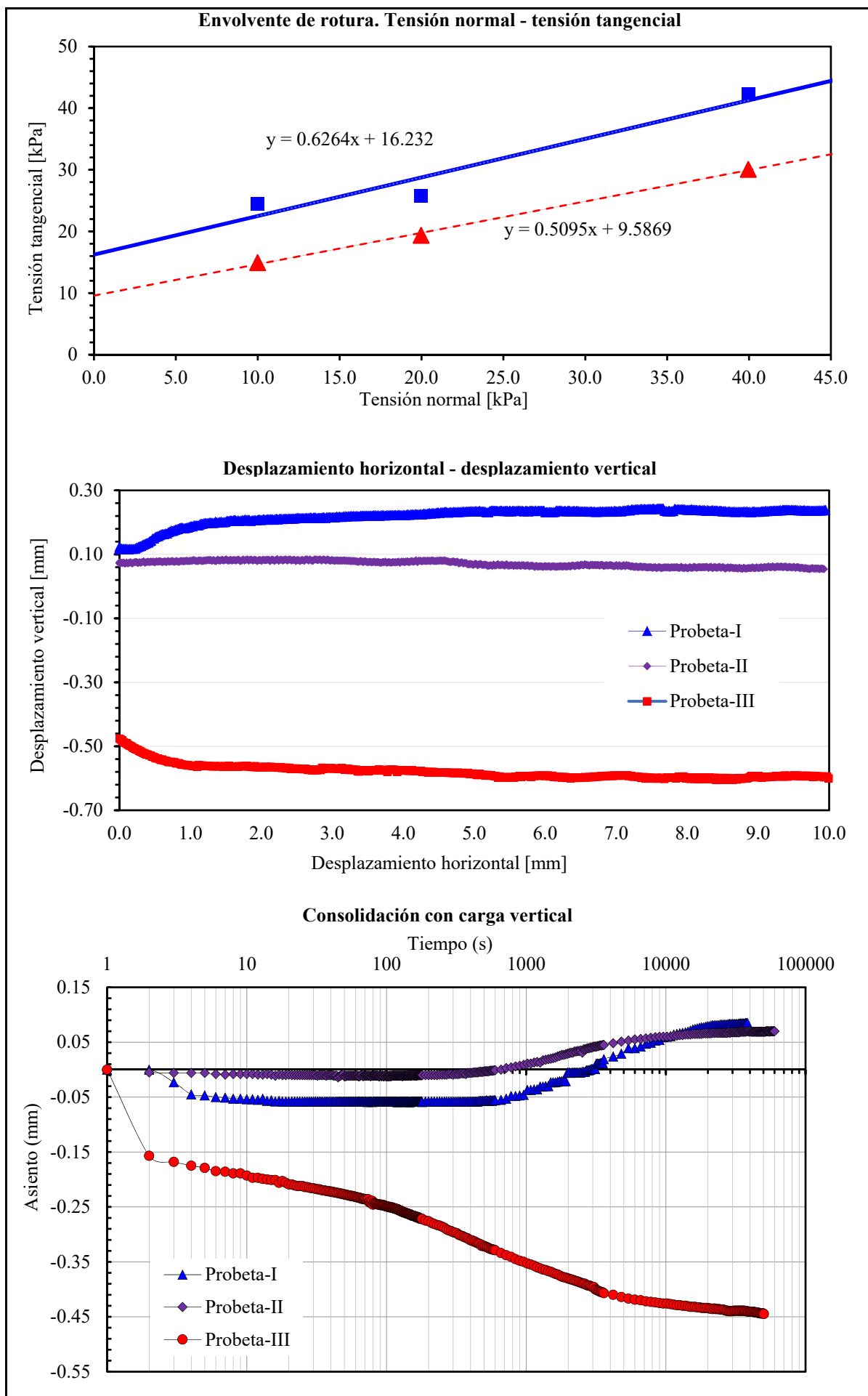
Norma UNE: 103 401: 1998

**Ubicación:** Deslizamiento Superficial Pre-Pirineo (Poblado de Cercs).  
**Sondeo:** PZ-2 **Muestra:** M-2  
**Estrato:** Argilita alterada **Profundidad:** 65 - 77 cm  
**Fecha:** 16/11/2018 **Ensayo:** Lab. GEOMAR

Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo			
Descripción	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte [mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en platodel equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de probeta de suelo inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	17.83	19.9	20.16
Contenido de humedad final [%]	22.31	23.51	21.8
Densidad húmeda inicial [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.07	2.06	2.07
Densidad húmeda final [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.75	1.72	1.72
Índice de poros inicial	0.544	0.573	0.541
Índice de poros final	0.25	0.263	0.431
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión tangencial máxima [kPa]	24.47	25.77	42.25
Tensión tangencial residual [kPa]	14.93	19.38	30.07
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]	16.23		
Cohesión residual [kPa]	9.59		
Ángulo de fricción interna pico [°]	32		
Ángulo de fricción interna residual [°]	27		

**Curva de desplazamiento vs resistencia residual**





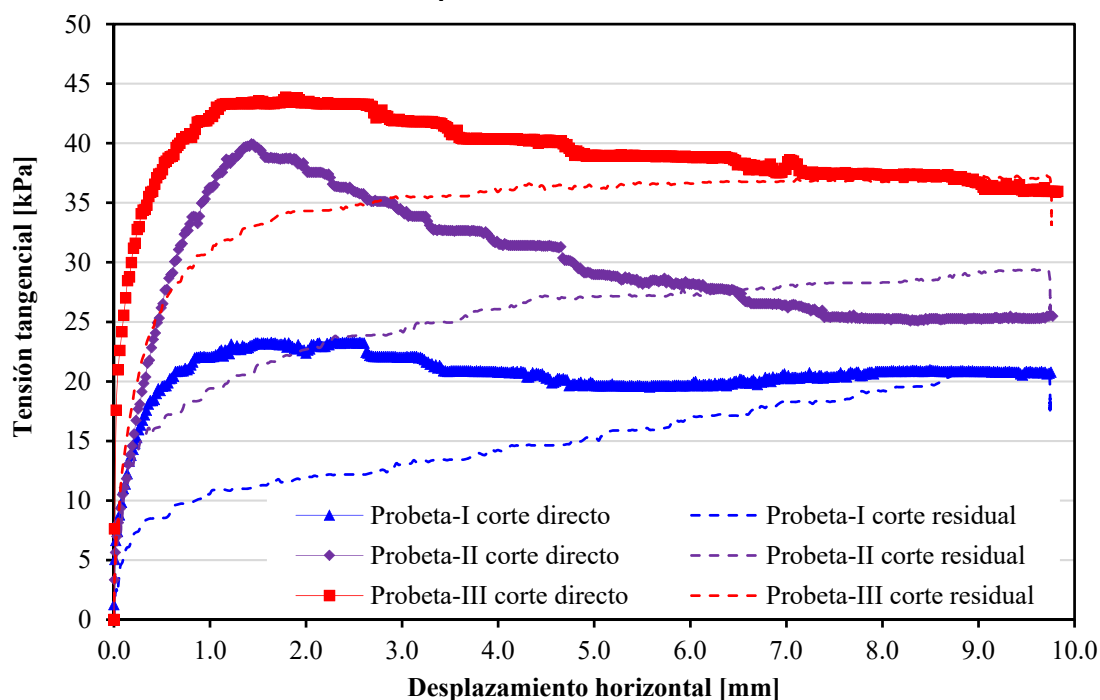
## ENSAYO DE CORTE DIRECTO

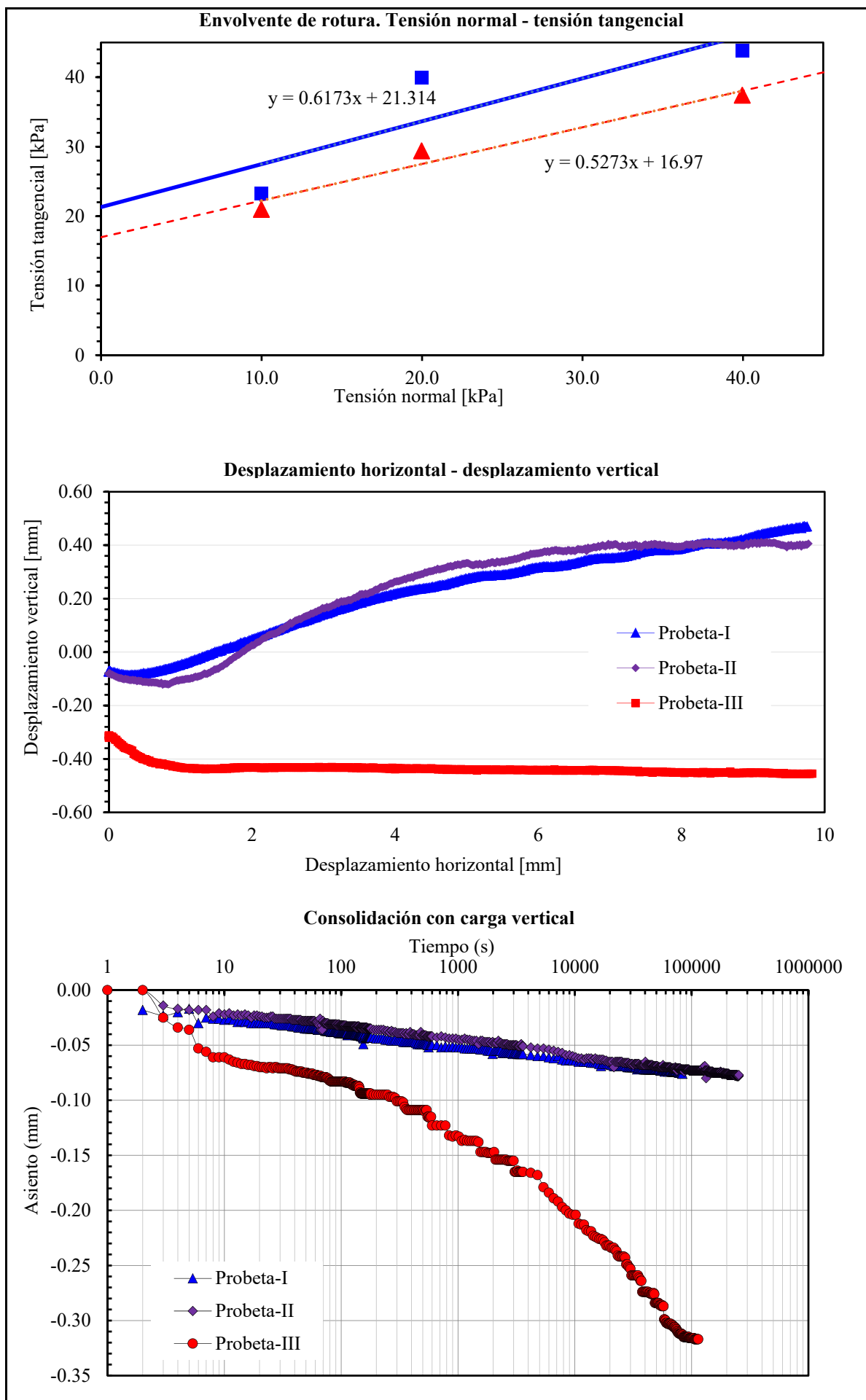
Norma UNE: 103 401: 1998

**Ubicación:** Deslizamiento Superficial Pre-Pirineo (Poblado de Cercs).  
**Sondeo:** PZ-3 **Muestra:** M-1  
**Estrato:** Argilita Inalterada **Profundidad:** 100-110 cm  
**Fecha:** 16/11/2018 **Ensayo:** Lab. GEOMAR

Descripción geométrica de la probeta y condiciones de ensayo			
Descripción	Probetas		
	I	II	III
Diámetro [cm]	5.00	5.00	5.00
Altura [cm]	2.50	2.50	2.50
Área de la sección del anillo [cm <sup>2</sup> ]	19.63	19.63	19.63
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	49.09	49.09	49.09
Velocidad de corte [mm/min]	0.02	0.02	0.02
Peso en platodel equipo [kp]	0.20	0.40	0.80
<b>Propiedades físicas de probeta de suelo inicio y final del ensayo.</b>			
Contenido de humedad inicial [%]	14.57	13.87	15.45
Contenido de humedad final [%]	19.09	17.14	17.03
Densidad húmeda inicial [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.08	2.08	2.08
Densidad húmeda final [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.82	1.82	1.80
Índice de poros inicial	0.45	0.48	0.50
Índice de poros final	0.48	0.48	0.48
<b>Tensiones</b>			
Tensión normal [kPa]	10.0	20.0	40.0
Tensión tangencial máxima [kPa]	23.27	39.96	43.87
Tensión tangencial residual [kPa]	20.98	29.40	37.41
<b>Parámetros resistentes</b>			
Cohesión pico [kPa]	21.31		
Cohesión residual [kPa]	16.97		
Ángulo de fricción interna pico [°]	32		
Ángulo de fricción interna residual [°]	28		

**Curva de desplazamiento vs resistencia residual**





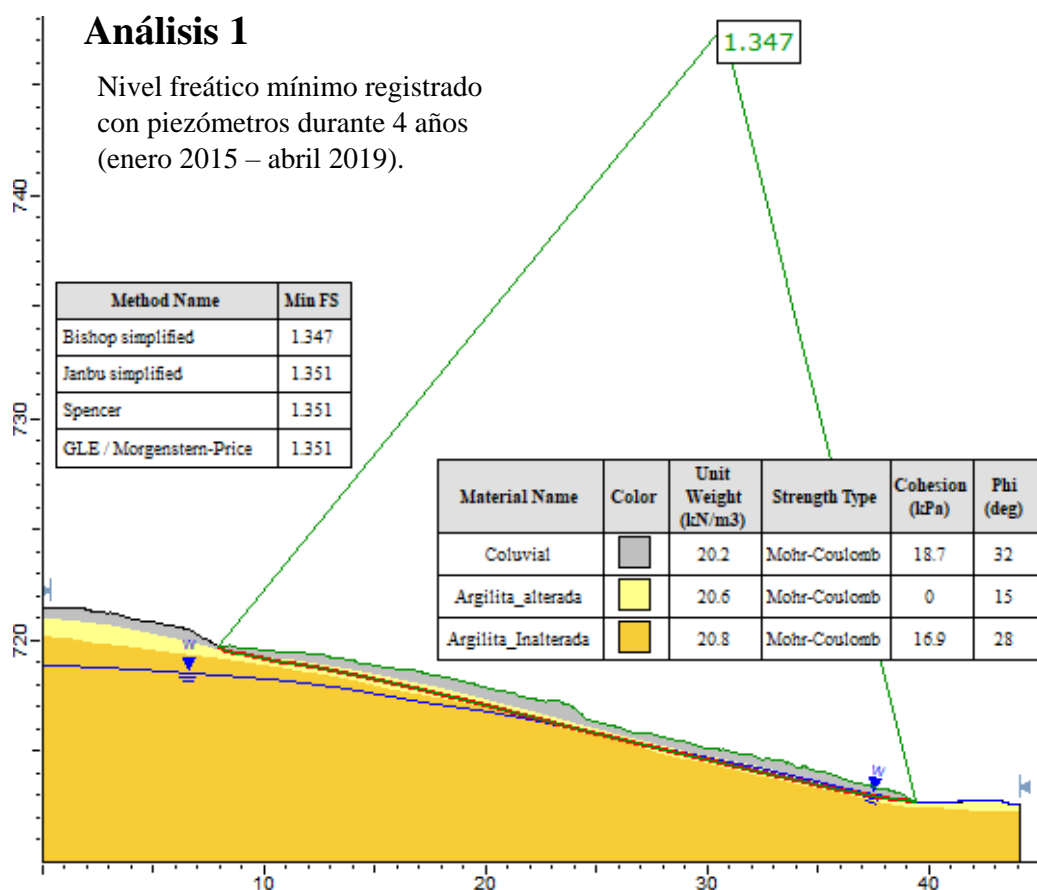
**ANEXO 3**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR EQUILIBRIO LÍMITE EN SLIDE  
EN LADERA DE CERCS**

---

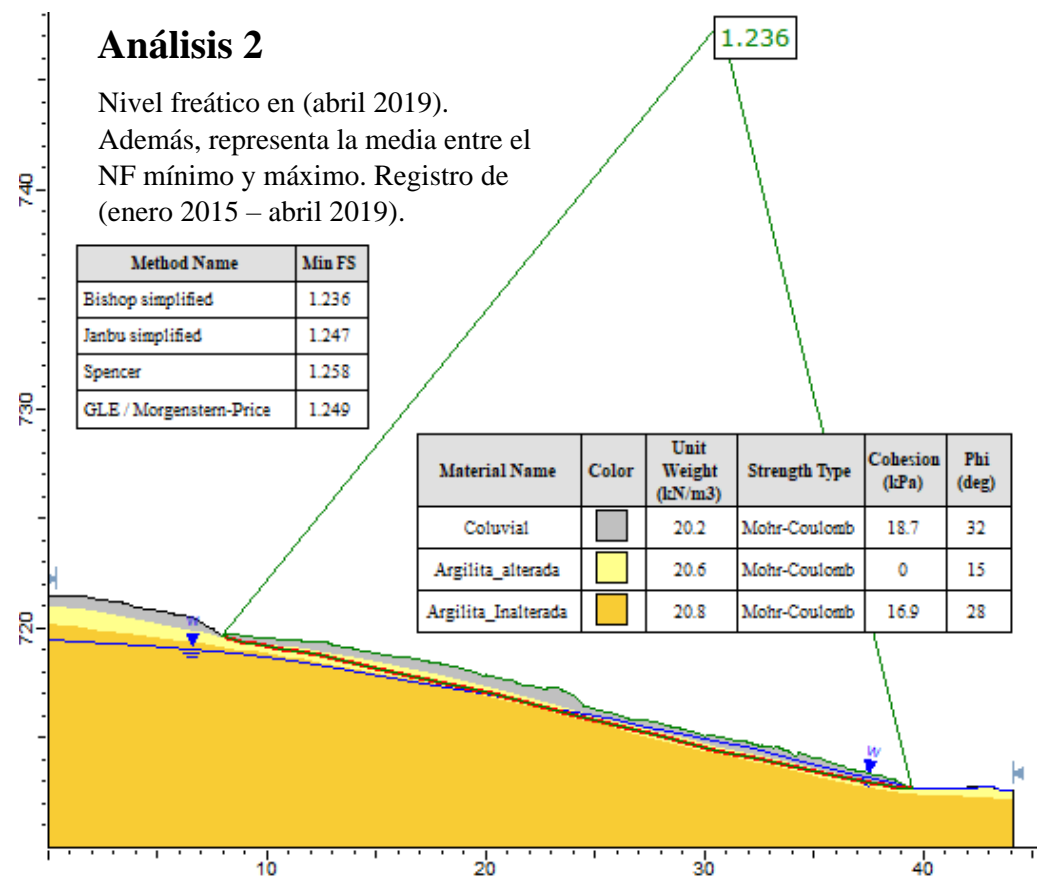
## Análisis 1

Nivel freático mínimo registrado con piezómetros durante 4 años (enero 2015 – abril 2019).



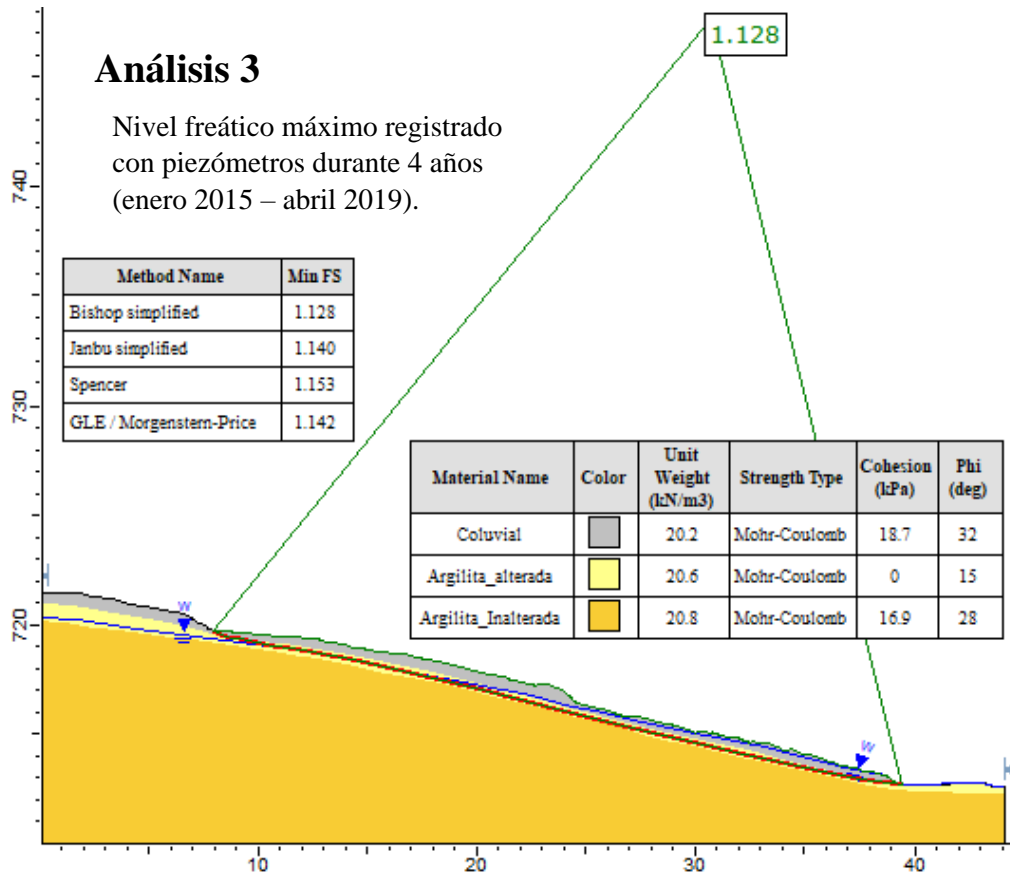
## Análisis 2

Nivel freático en (abril 2019).  
Además, representa la media entre el NF mínimo y máximo. Registro de (enero 2015 – abril 2019).



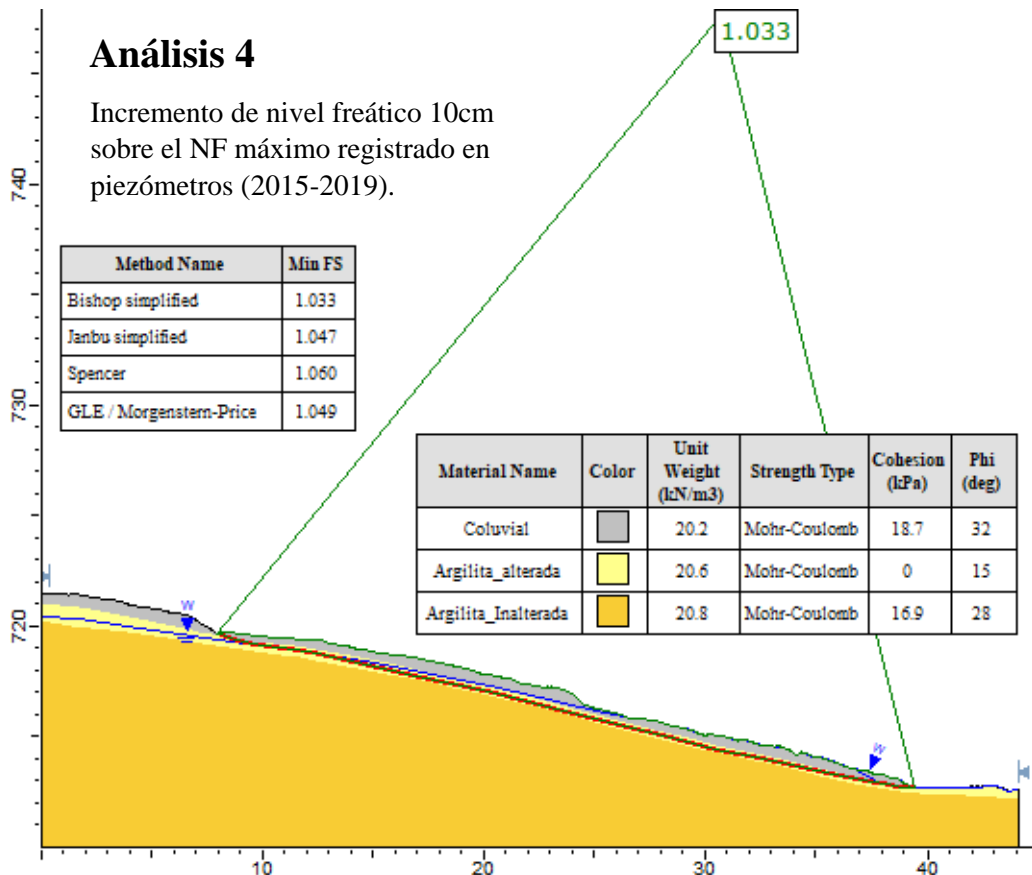
### Análisis 3

Nivel freático máximo registrado con piezómetros durante 4 años (enero 2015 – abril 2019).



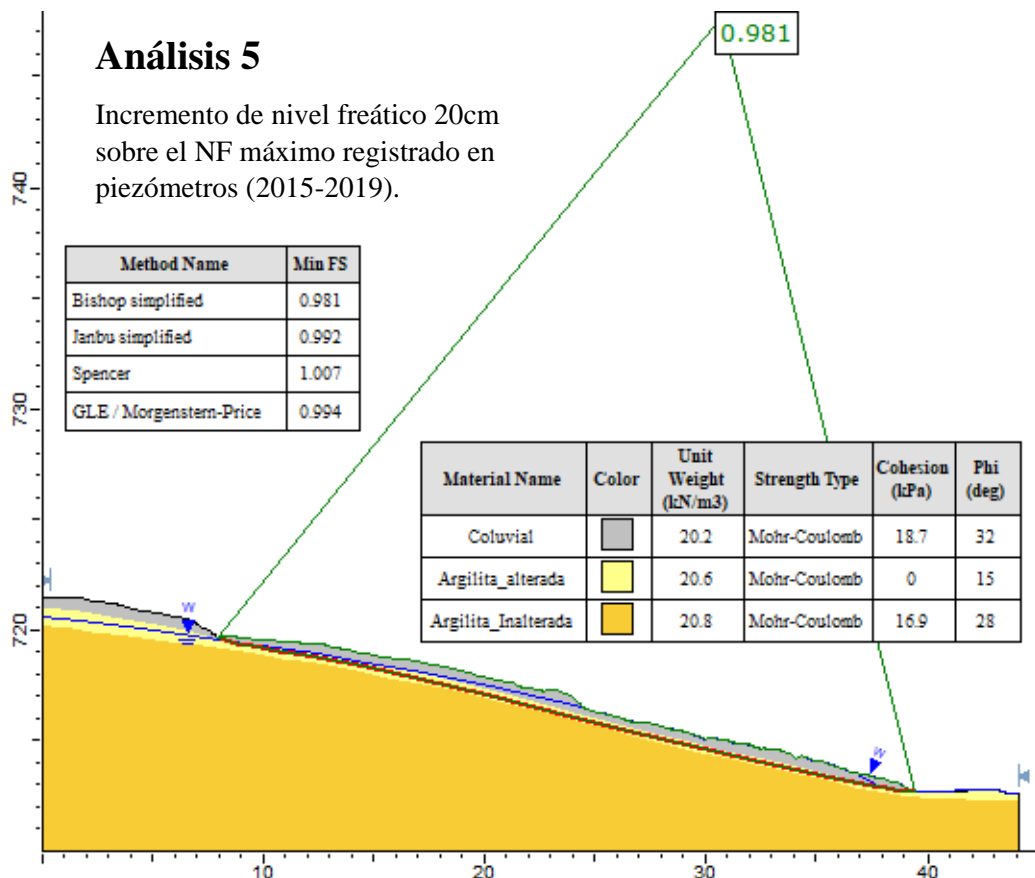
### Análisis 4

Incremento de nivel freático 10cm sobre el NF máximo registrado en piezómetros (2015-2019).



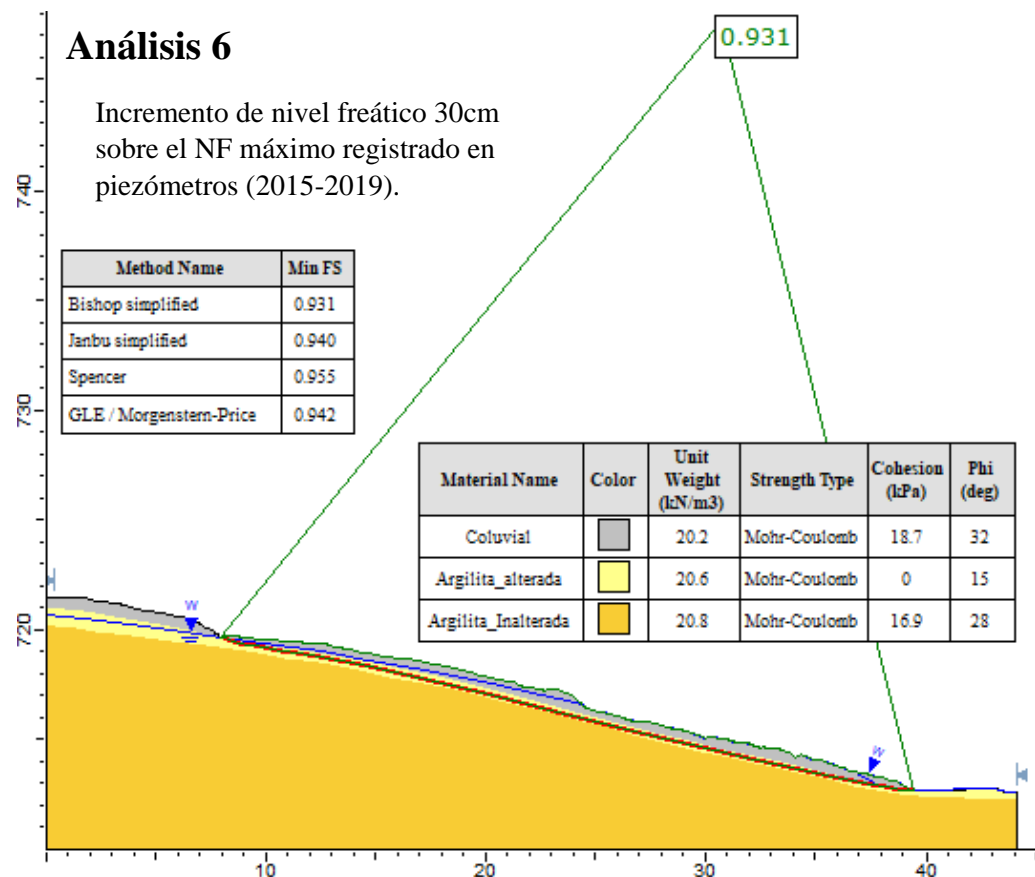
## Análisis 5

Incremento de nivel freático 20cm sobre el NF máximo registrado en piezómetros (2015-2019).



## Análisis 6

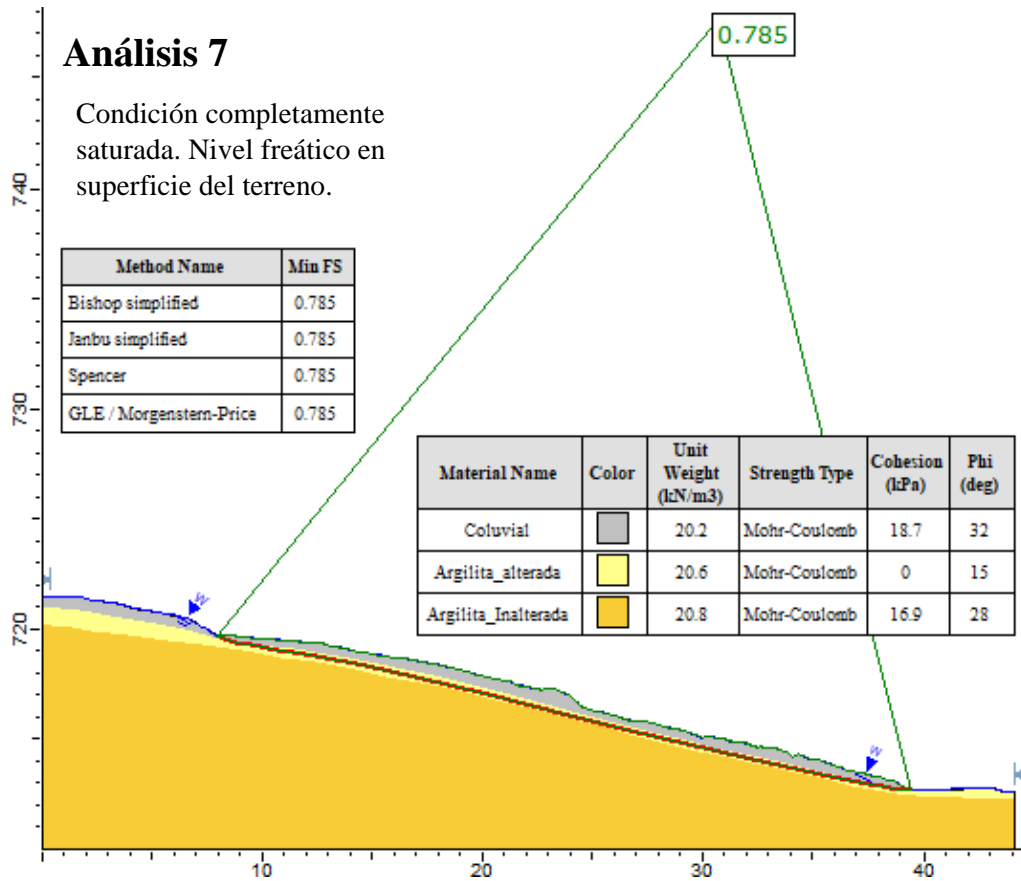
Incremento de nivel freático 30cm sobre el NF máximo registrado en piezómetros (2015-2019).





## Análisis 7

Condición completamente saturada. Nivel freático en superficie del terreno.



#### **ANEXO 4**

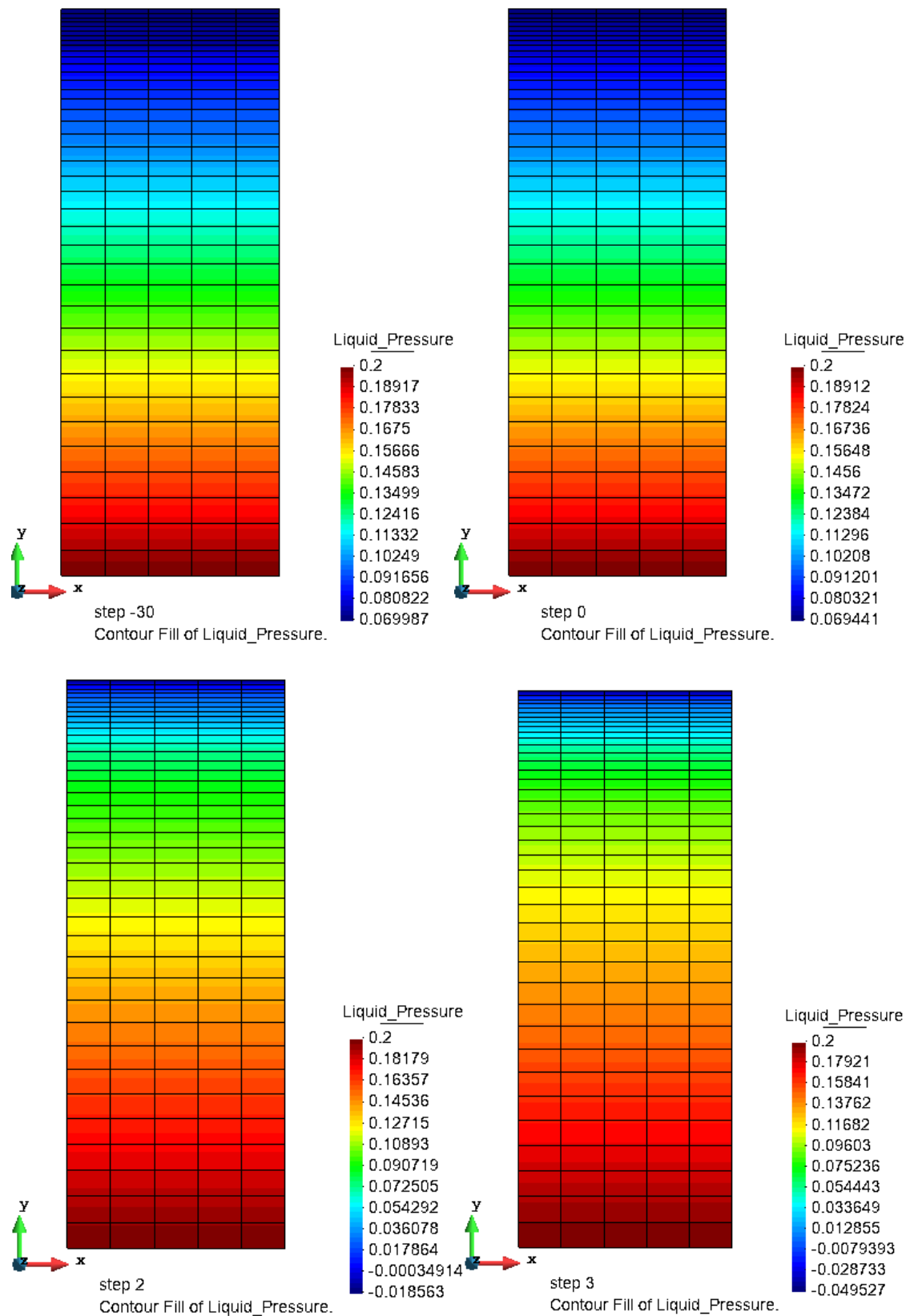
### **MODELACIÓN NUMÉRICA EN CODE\_BRIGHT TERMO-HIDRÁULICO EN LADERA CERCS**

Modelo 1D: Presión de líquido, temperatura y grado de saturación

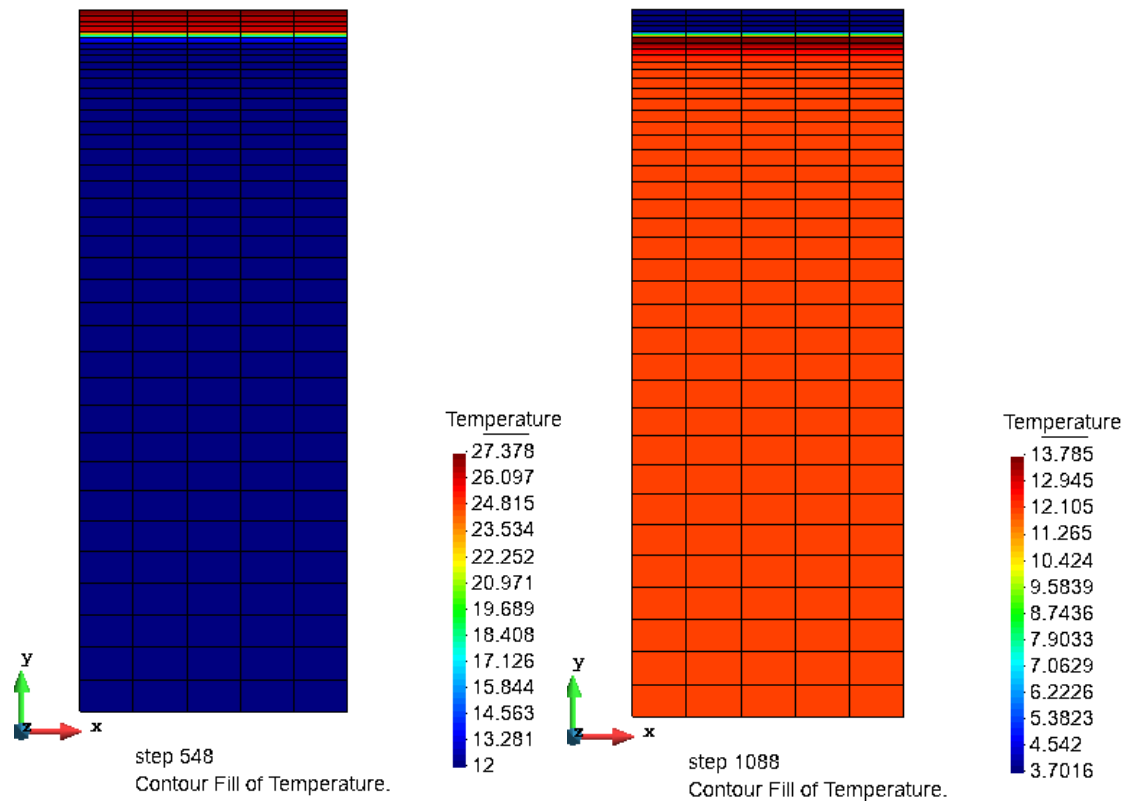
Modelo 2D: Presión de líquido, temperatura y grado de saturación

---

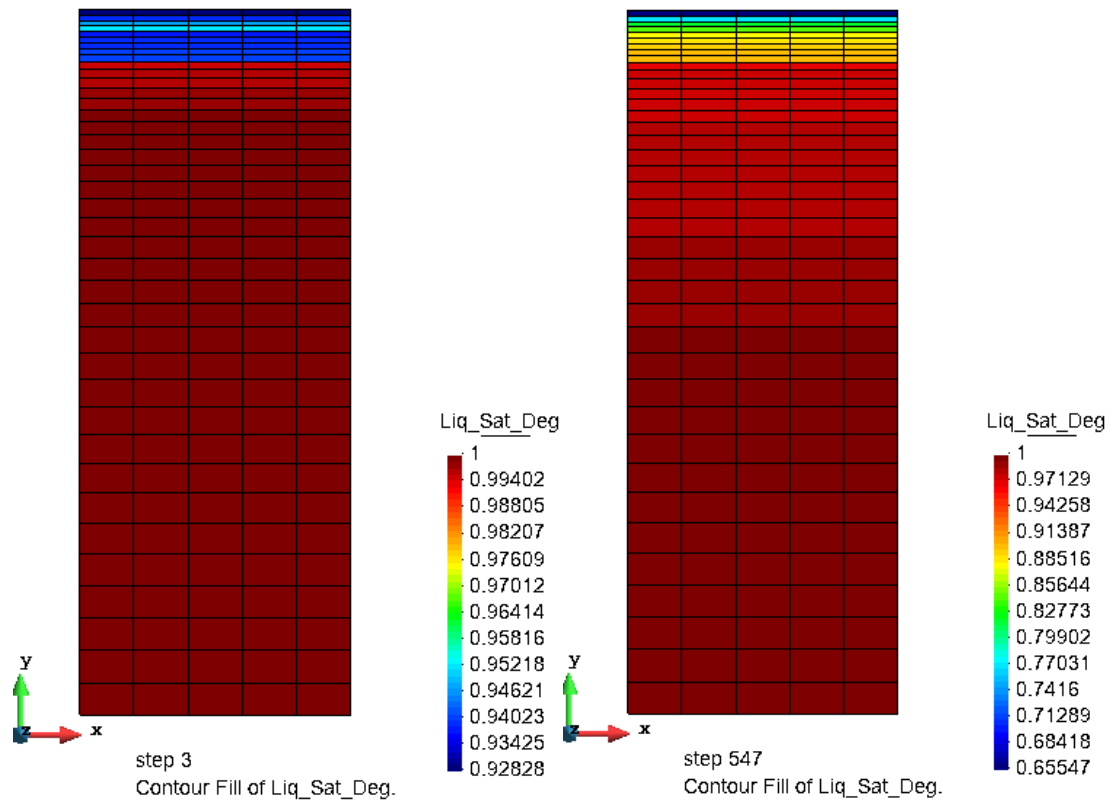
# MODELO 1D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE PRESIÓN DE LÍQUIDO.



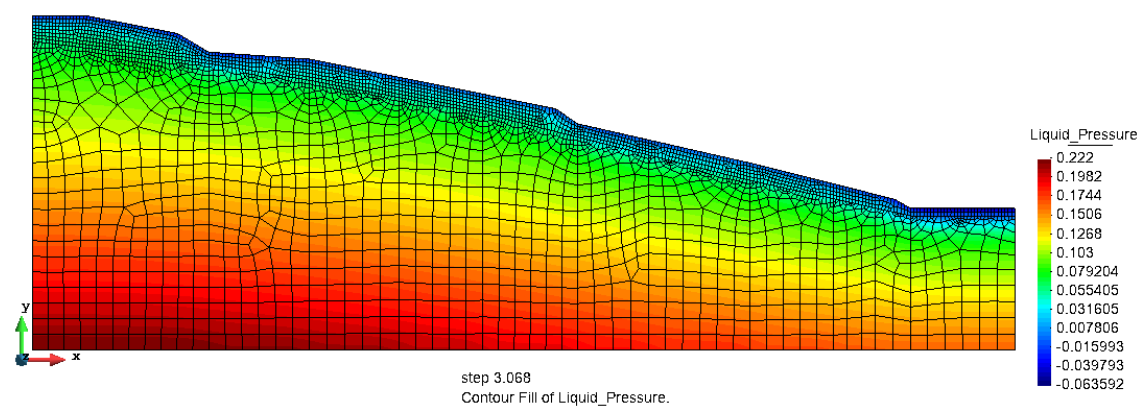
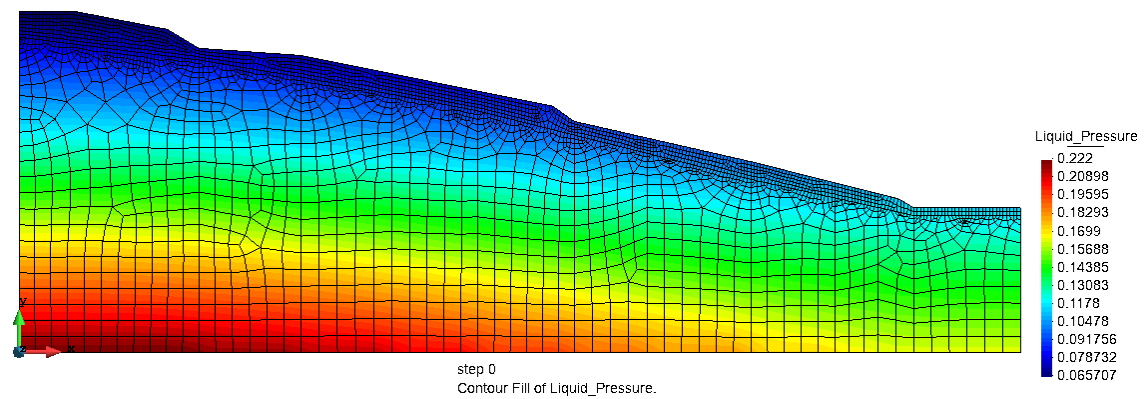
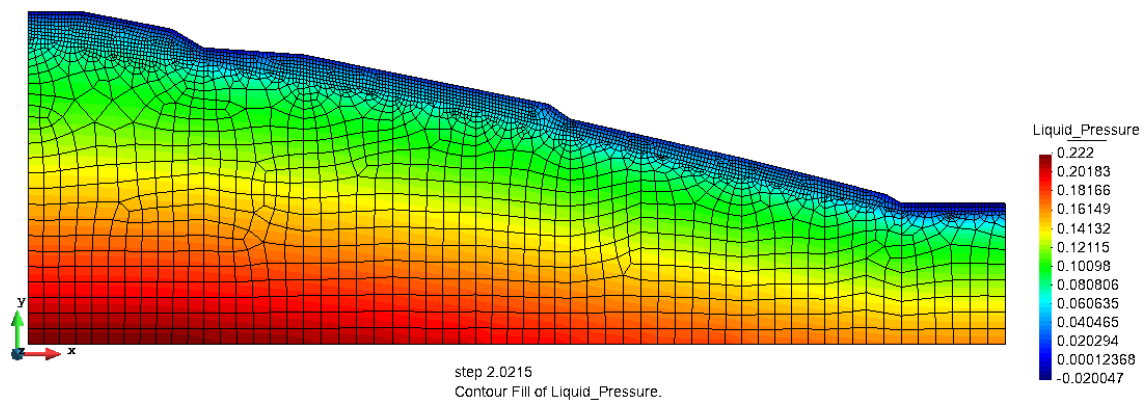
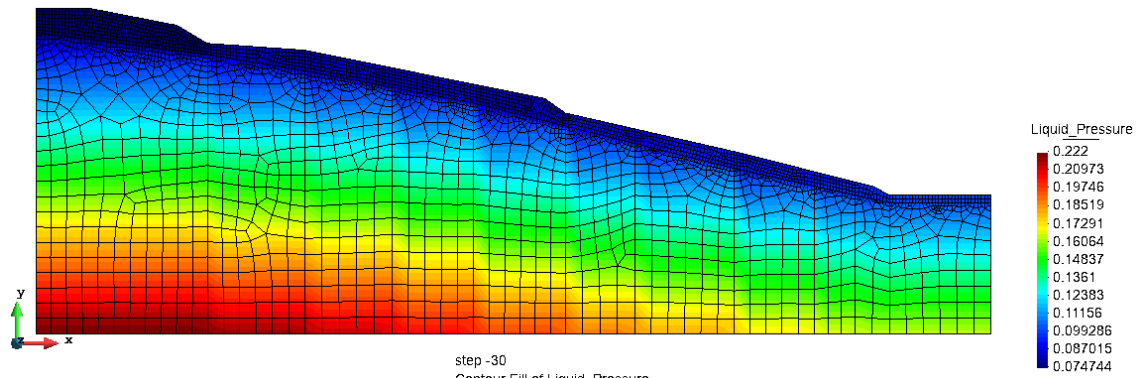
### MODELO 1D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE TEMPERATURA



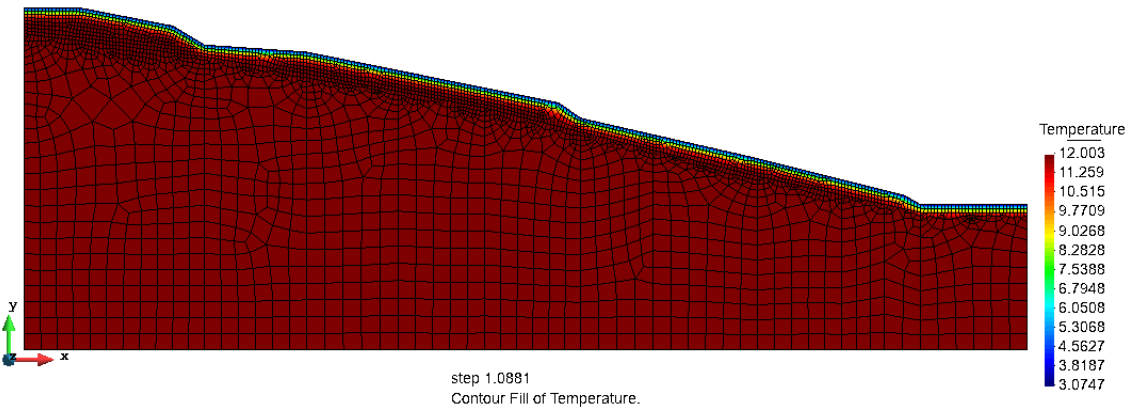
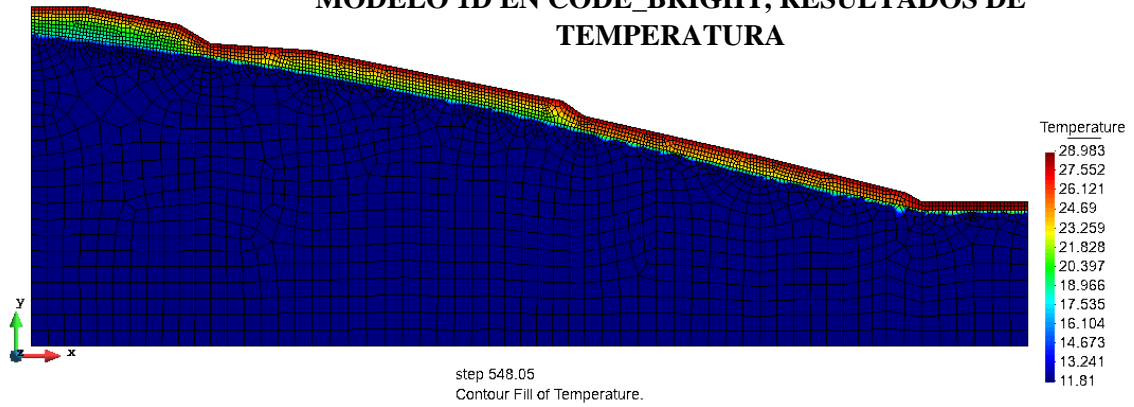
### MODELO 1D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE GRADO DE SATURACIÓN



## MODELO 2D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE PRESIÓN DE LÍQUIDO.



## MODELO 1D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE TEMPERATURA



## MODELO 2D EN CODE\_BRIGHT, RESULTADOS DE GRADO DE SATURACIÓN

